

Title	洪水災害軽減のための流域-人間系のモデル化と管理に関する研究( Dissertation_全文 )
Author(s)	掘, 智晴
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	1993-11-24
URL	<a href="http://dx.doi.org/10.11501/3073219">http://dx.doi.org/10.11501/3073219</a>
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

新 制
工
933
京大附図

# 洪水災害軽減のための 流域-人間系のモデル化と管理に関する研究

1993年 6 月

堀 智 晴

洪水災害軽減のための  
流域-人間系のモデル化と管理に関する研究

1993年6月

堀 智 晴

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>協調問題解決型洪水制御支援環境の開発</b>	<b>7</b>
2.1	概説	7
2.2	洪水制御のための貯水池操作の現状と課題	8
2.2.1	洪水調節ダムの操作方式	8
2.2.2	最適操作 vs. 知識ベース型操作 vs. 現行操作	9
2.3	洪水制御支援環境の全体構成	11
2.4	推論システムの設計	13
2.4.1	推論システム (IS) 開発に用いる基本的な手法	13
2.4.2	洪水制御支援のための推論システムの全体構成	18
2.5	適用と考察	19
2.5.1	適用流域と対象洪水	19
2.5.2	支援環境設計過程における洪水管理モデル	20
2.5.3	貯水池操作規則をもとにした知識構成	22
2.5.4	適用結果と考察	24
2.6	結語	25
<b>3</b>	<b>洪水制御支援環境へのファジイ推論の導入</b>	<b>31</b>
3.1	概説	31
3.2	洪水制御のための知識とファジイ理論	31
3.3	ファジイ推論を導入した推論システムの構成	33
3.3.1	ファジイ推論を行う知識システムの設計	33
3.3.2	洪水制御支援のためのファジイ推論ルールの形式とルールの自動作成	34
3.3.3	プロダクションシステムとファジイ推論システムの協調	36
3.3.4	推論システムの全体構成	38
3.4	対話型画面表示システムの設計	39
3.5	適用と考察	42
3.5.1	適用貯水池システムと対象洪水	42
3.5.2	各知識システムの設計	42
3.5.3	適用結果の一例	46



3.6 結語	49
<b>4 洪水制御支援のための知識の構成と獲得法</b>	<b>53</b>
4.1 概説	53
4.2 洪水制御支援のための知識の構成と獲得方法	54
4.2.1 知識構成からみたダム操作支援知識ベースシステムの現状と課題	54
4.2.2 洪水制御支援のための知識ベースの構成方法	56
4.2.3 洪水制御支援のための知識の構造と獲得について	58
4.3 多段階知識ベース構成法に基づく推論システムの設計	59
4.3.1 多段階知識ベース構成法における知識システム間の協調関係	59
4.3.2 議長型システムの設計	61
4.3.3 データ参照システムの設計	62
4.3.4 メタ知識システムの設計	63
4.4 推論システムと手続き型知識システム・データ管理システムとの協調	65
4.5 適用と考察	66
4.5.1 知識ベースの構成	67
4.5.2 適用結果と考察	70
4.6 結語	76
<b>5 洪水制御支援のための降雨・流量観測システムの設計</b>	<b>79</b>
5.1 概説	79
5.2 流出予測の精度を基準とした降雨・流量観測システムの設計問題	80
5.3 降雨・流量観測が流出予測精度に及ぼす効果の算定	82
5.3.1 降雨観測が流出予測の精度に与える影響	82
5.3.2 流量観測が流出予測の精度に与える影響	83
5.4 適用と考察	85
5.4.1 適用流域モデル	85
5.4.2 降雨強度分布の先験的モデル	85
5.4.3 降雨観測のみを行った場合の最適観測所位置	88
5.5 結語	91
<b>6 水害避難行動シミュレーションのためのマイクロモデルの開発</b>	<b>95</b>
6.1 概説	95
6.2 水害避難行動に関する過去の研究事例	96
6.2.1 水害避難行動に関する調査研究	96
6.2.2 避難シミュレーションに関する研究	97
6.3 水害避難行動を規定する要因とそのモデル化	98
6.3.1 水害避難行動に対する初期条件	99
6.3.2 水害避難行動の外的要因	100
6.3.3 水害避難行動の内的要因	101

6.4	水害避難マイクロモデルの設計	102
6.4.1	情報の入手状況を取り扱う過程	103
6.4.2	避難開始の意思決定過程	106
6.4.3	避難場所・経路の決定過程	108
6.4.4	避難行動過程	109
6.4.5	画面表示システムの設計	110
6.5	水害経験のシミュレーション	110
6.6	適用と考察	112
6.6.1	適用対象地域の概要	112
6.6.2	マイクロモデルによる水害避難シミュレーション	112
6.7	結語	120
7	住民意識の変化過程を考慮した水害避難行動モデルの開発	123
7.1	概説	123
7.2	水害意識の変化過程とそのモデル化	123
7.2.1	水害危険観の導入	124
7.2.2	水害情報の評価モデル	125
7.2.3	水害意識の経時変化モデル	127
7.3	意識変化を考慮する場合の水害避難行動モデルの設計	127
7.3.1	危険認識度の算定モデル	127
7.3.2	主観的生起確率の決定方法	129
7.4	適用と考察	131
7.4.1	情報が空振りに終わった場合の水害意識の変化の例	132
7.4.2	時間の経過が水害意識に及ぼす影響に関するシミュレーション	132
7.5	結語	136
8	結論	139
A	確率ベクトル場に対するフィルタリング理論の誘導	143
B	用語集	155

# 目 次

2.1	協調問題解決型洪水制御支援環境の全体構成	12
2.2	協調問題解決型推論システム	16
2.3	オブジェクト指向の概念	17
2.4	推論システムの全体構成	19
2.5	対象貯水池システム	20
2.6	天ヶ瀬ダムの洪水調節方針	23
2.7	画面表示システムの出力例	25
2.8	制御結果の一例	26
3.1	ファジイ推論の方法	34
3.2	推論システムの全体構成	38
3.3	画面表示例(基本画面)	40
3.4	画面表示例(ユーザーの操作)	40
3.5	画面表示例(推論に用いたデータの表示)	41
3.6	画面表示例(ファジイ推論の内容説明)	41
3.7	制御結果1	47
3.8	制御結果2	47
3.9	制御結果3	48
3.10	制御結果4	48
4.1	洪水制御支援のための多段階知識ベース構成法	58
4.2	独立した知識システム群による協調関係	60
4.3	メタ知識システムを導入した場合の知識システム間の協調関係	61
4.4	プロダクションシステムを用いるメタ知識システムの定義	64
4.5	ファジイ推論を用いるメタ知識システムの定義	64
4.6	LAN を利用した分散型洪水制御支援環境	67
4.7	多段階知識ベース構成法による推論システムの全体構成	68
4.8	流入量最大時期の判定例	73
4.9	レベル1 の知識構成によるシステムの運用結果	74
4.10	レベル2 の知識構成によるシステムの運用結果	75
5.1	降雨・流量観測システム	81

5.2	適用流域モデルの概要	86
5.3	観測の効果を考えない場合の降雨強度の平均	87
5.4	観測の効果を考えない場合の降雨強度の分散	87
5.5	観測の効果を考えない場合の流量の推定値	89
5.6	観測の効果を考えない場合の流量推定値の分散	89
5.7	流出速度と雨量計の最適位置	90
5.8	ピークを形成する降雨の時空間分布	91
6.1	水害避難行動を規定する要因	99
6.2	水害避難マイクロモデルの全体構成	104
6.3	生活時間帯を表すファジイ集合	106
6.4	画面表示システムの出力例	111
6.5	適用地域の概要	113
6.6	水害経験のシミュレーション	117
6.7	避難命令の発令時期を変えた場合の避難状況	118
6.8	水害情報を与えた場合の避難状況	119
7.1	水害意識の変化過程	125
7.2	水害意識の経時変化モデル	128
7.3	意識変化過程を考慮した水害避難行動モデルの全体構成	130
7.4	適切でない情報が避難効果に与える影響に関するシミュレーション	133
7.5	時間の経過が水害意識に及ぼす影響に関するシミュレーション	135



# 表 目 次

2.1	3通りのルールによる制御結果の比較	27
3.1	ファジイ推論ルールの作成法	36
6.1	水害避難ミクロモデルを構成する知識システムの概要	105
7.1	意識変化を考慮した水害避難行動モデルを構成する知識システムの概要	131

# 第 1 章

## 序論

本論文は、水工学における諸問題の中で、洪水現象と人間行動の関わる部分に焦点をあて、そのモデル化と管理の方法について考察したものである。

洪水災害などの自然災害は、自然現象と人間活動の関わりの中で生起する。したがって、自然災害の防止・軽減のためには、災害を引き起こす外力である自然現象そのもののメカニズムを知ることが重要であると同時に、自然現象と災害の受け手である人間の行動との相互関係の把握もまた重要な要素になる。自然災害が生起する場を、水文現象の発生場である流域と流域に関わる人間とから構成される系ととらえると、そこには、大別して次の3種類の人間的要素が存在することがわかる。1つは、流域の住民を中心とした災害の被害主体としての人間である。もう1つは、災害防止に携わる人間である。3番目は、自然環境に働きかけ、改変を行う人間である。被害主体としての人間に関する問題としては、被害の評価方法などの問題の他、避難行動を行う人間の分析などがある。災害防止に携わる側における人間的要素の最も大きなものは、防災施設の制御や情報の発令における意思決定の問題である。特に、近年では、長年の設備投資の結果、ダム貯水池を中心とした操作を要する水工施設が多数稼働するとともに、これらの操作の際に参照すべき情報も増加しており、貯水池の操作などにおける人間の意思決定の支援、ミスの防止策が重要になってきている。3番目の要素は、近年、叫ばれつつある地球環境問題と密接に関連している。

洪水とそれを管理する側の人間との関係で、最も重要なものは貯水池に代表される洪水調節施設の操作であろう。既に、我国ではこれら施設の整備に努力が払われた結果、ゲート操作を必要とする洪水調節用貯水池は200近くに達し[1]、洪水防御システムは大規模かつ複雑なシステムを構成している。洪水防御システムを効果的に操作しようとする試みは、DP理論に代表されるOR的手法を用いた方法を中心に、多くの成果を挙げている。これらの方法は、貯水池あるいは貯水池群の操作において利用可能な情報を効率的に活用し、いわば、操作の理想型を示すものといえる。また、別の見方をすればOR的手法に基づくアプローチは、貯水池管理の自動化を追求するものということもできる。しかし、現実には、精緻に構築されたシステムであっても非常時に最終的にその管理に関わってくるのが人間であることも忘れてはならない。例えば、近代技術の粋を集めたといわれる航空機や原子力発電所などのシステムでも、わずかな人間のミスから崩壊する例を我々は知っている。また、人間の存在を積極的に意識しないで設計されたシステムが、非常時には、逆にそれを管理するはずの人間をパニックに陥れる場合もある。例えば、1979年アメリカで起きたスリーマイル島原子力発電所の事故の際には、原子炉の異常を示すために用意されていた多数の装置類が一斉

に異常を報知したため、操作員はどの計器を見ればよいのか、また、何から手をつけて良いのか全くわからなかったという[2] これらの例は、大規模かつ複雑なシステムの制御を考える上で、それを管理する人間の存在を念頭に置いた方法論が必要であることを示している。洪水調節を行うダム貯水池は、洪水といういわば非常時を想定して建設されたものである。したがって、貯水池操作に関連するシステムもそれに関わる人間の存在を意識した設計となっている必要がある。そのためには、洪水管理に携わる人間の認知能力の範囲や思考様式・行動様式を知った上で、洪水の各時間断面において、それを受け取る人間の思考・行動様式と洪水の状況の両者に応じて、判断の助けとなる情報や判断に誤りのないように導く情報を提供するシステムが必要になる。また、このようなシステムこそ従来から研究されてきた洪水時貯水池操作の理想的な形と現実の操作との溝を埋める橋渡しの役割を果たすことができる。

一方、洪水の被害を受ける側の人間に関して洪水災害の防止・軽減という観点から重要な問題の一つは、水害時の避難行動である。避難行動は、災害の軽減活動の主体が被害主体であるという点に特徴があり、この行動を制御する手段は情報の提供など間接的なものにならざるを得ない。ところが、提供される情報の効果は、その受け手である住民の心理に依存する。住民の心理は、過去の経験そして洪水の状況に大きく依存している。このような認識から、災害に対する意識の調査や避難行動の調査が行われるとともに、浸水状況と避難行動の関係をシミュレーションするモデルの開発も行われている。この中では、住民の意識や心理過程、情報伝達に関する分析には主として人文・社会科学的アプローチがとられる一方、浸水時の移動過程と洪水氾濫の関係分析には工学的モデルが用いられてきた。ところで、水害時の避難行動を円滑化すべく施策を講じたとしても、その効果や問題点を事前に把握するために実験を行うことは困難である。したがって、避難行動に関して行われた調査によって得られた知見を反映できる避難行動モデルを計算機上に構築する必要性は極めて高い。特に、避難情報の内容や発令時期を考えるためには、住民の水害に対する意識や心理過程等人文・社会科学的要素も取り込んだ工学的モデルが必要になる。

さて、以上に述べたように流域-人間系のモデル化を考える際には、自然現象の再現や予測といった物理的・数学的モデルによる扱いが適した部分と、人間の認知や思考・心理といった人工知能技術による扱いが適した部分とが存在することにも注意しなければならない。洪水制御支援システムあるいは水害避難行動モデルにおいては、両者が有機的に連携してこそ初めて必要な機能を果たすことが可能になる。このことは、主として数値計算を中心とする計算能力を優先するソフトウェア(もしくはそのために設計されたハードウェア)と、言語形式で表現された情報を中心とする処理能力を優先するソフトウェア(ハードウェア)とを連携・融合させて利用することが必要であることを示している。さらに、流域-人間系において扱うべき要素が多種多様であることを考慮すると、そのモデル化にあたっては各要素の可能な限りのモジュール化を図る必要がある。これらの問題に対応するためには、各モデルの実現に当たって、オブジェクト指向プログラミングの考え方による設計を行うことでソフトウェア要素間の独立性を高めるとともに、各モデルをネットワーク対応の仕様にする事で異なる種類の情報処理機能を融合させる枠組みを設計しておく必要がある。

本論文では、以上の観点から、災害防止に携わる人間および被害主体となる人間と洪水現象の関わりをモデル化し管理する方法を考察する。以下、本論文の内容を要約しておく。

第2章から第5章では、上記の人間の要素の内、洪水の管理に携わる人間すなわち貯水池操作における実務者の思考様式のモデル化および支援方法を考察する。

第2章では、本研究で提案する洪水制御支援システムと従来から研究されてきた貯水池の最適操作手法および現行の操作の関係を明らかにした上で、洪水の制御が降雨・流量の確率予測のように主として数学的なモデル化の適した定量的かつ手続き的なデータ処理と、ダム操作規則のように言語形式で表される知識や実務者個人の資質や経験に依存する定性的な情報処理との両者を統合したものであることに注意し、数学的モデル化の可能な問題を処理する手続き型知識システムと言語形式で表現される知識の利用機構である推論システムとの協調と、推論システム内部での知識システム間の協調を軸とした協調問題解決型洪水制御支援環境を設計する。

第3章では、第2章で開発した洪水制御支援環境の情報処理能力を高めるとともに、ダム操作規則内の曖昧な表現をも知識ベースに取り込むべく、推論システムを構成する知識システム群を、扱う知識の種類や特徴に応じて、クリスプ推論を行うプロダクションシステムとファジイ推論システムとに分類し、両者の協調による洪水制御の支援方法を考察する。また、ファジイ推論ルール作成に当たっては、実務者の判断様式を、判断材料となる情報に対する重みを導入することによってモデル化し、知識獲得を支援する方法について考察するとともに、作成した洪水制御支援システムが実務者の判断過程をシミュレーションするモデルとしても扱えることを示す。あわせて、対話型画面表示システムを設計し、推論結果の提供方法や推論結果に対する根拠の表示方法について考察する。

第4章では、現在までに提案されてきた洪水制御支援知識ベースシステムを知識の構成及び獲得といった観点から概観し、現在、知識ベースに基づくダム操作の支援という手法が直面している知識獲得が困難であるという問題の本質を明らかにする。その上で、今後、ダム操作支援知識ベースシステムが洪水時ダム操作の信頼性を高めるものとして実用化されていくために満たすべき条件を明示する。そして、ここで提示された条件を満足する知識の構成方法として、第2,3章で設計した協調問題解決型推論システムを拡張し、判断に利用できる情報のレベルに応じた多段階知識構成法を提案する。

第5章では、洪水制御を支援する上で、意思決定の鍵となる情報である降雨・流量の観測及び予測情報について考える。特に、洪水制御を考える上では、降雨・流量観測情報が流出予測の基礎情報として用いられる点に注意し、降雨・流量観測システムを流域下流端での流量予測精度、特にピーク流量の予測精度を評価基準として設計する方法を展開する。

第6,7章では、流域-人間系の中で、洪水災害の被害主体となる人間のモデル化および管理手法について考察する。

第6章では、水害避難に関する現地調査の結果を、計算機上での避難シミュレーションに反映し、避難の制御方法や防災教育への提言を行うべく、世帯レベルの水害避難行動を再現するマイクロモデルを設計する。モデル構築にあたっては、水害避難行動を規定する要因を、住民の水害意識や生活形態といった初期条件、浸水の危険性に対する認識や水害情報への関心といった内的要因、水害時に与えられる情報や浸水位等の外的要因の3種に分類し、これら要因及び避難行動の関係を複数の知識システムを用いて記述する。また、設計したモデルを用いて、1982年長崎水害時の住民の避難行動をシミュレートし、水害避難マイクロモデルの適用性と問題点について考察する。

第7章では、第6章で開発した水害避難マイクロモデルをより精密にし、水害経験そのものを計算機上に再現できるようにすることを目的として、流域住民の水害に対する意識が水害を経験することによって、あるいは、長期間水害を経験しないことによって変化する過程をモデル化する。具



体的には、水害危険観と情報依存度という 2 種類のパラメータを定義することにより、住民が日常的に持っている水害に対する意識と洪水時に与えられる情報に対する個々人の評価を表現する。ついで、これらパラメータを台集合とするファジイ集合と浸水位 入手情報の適否との関係をファジイ推論ルールで記述することにより、水害経験によって意識が変化する過程をモデル化する。また、時間の経過にともなう水害意識の変化過程は、これらパラメータ上に定義されたファジイ集合の形状を変化させることによって表現する方法を検討する。

第 8 章では、本研究のまとめと結論を述べる。

## 参 考 文 献

- [1] 建設省河川局(監修)：日本の多目的ダム，山海堂，1980.
- [2] 柳田邦男：恐怖の2時間18分，文春文庫，1986.

## 第 2 章

# 協調問題解決型洪水制御支援環境の開発

### 2.1 概説

本章では、洪水の管理に携わる人間のモデル化および意思決定支援の方法を考える第一歩として、洪水時の貯水池操作を対象とした意思決定支援問題について考察する。ゲート操作を伴うダム貯水池による洪水の管理は、雨量・流量・水位等の観測データによる現状把握に始まり、これら観測データをもとにした予測情報の作成、観測データ・予測情報と貯水池操作規則との照合を経て放流量の決定とその指示・連絡に至る極めて多種・多量の情報処理を伴うプロセスから成る。このプロセスの中で要求される意思決定は、洪水の状況に応じて過去の出水経験や避難・水防活動の進行状況、さらに気象状況をも考慮にいった総合的なものであるとともに、管理の時間的な遅れが生じないように即時的なものであることが要求される。さらに、以上の現状把握から意思決定、指示・連絡に至るまでの一連のプロセスは、洪水の継続期間中一定時間間隔あるいは不規則に繰り返されるものであるため、洪水の管理に携わるものは長時間極度の緊張状態に置かれることになり、ヒューマンエラーの発生する可能性は少なくない。したがって、これらの一連のプロセスを総合的に支援するシステムの必要性は極めて高い。

ところで、洪水制御を総合的に支援するためには、定量的情報のみならず、定性的な情報の処理や言語形式で表される規則や知識をも包含した情報の処理技術が必要であるとともに、支援システム稼働後も新たな知識を容易に追加できることが必要である。言語形式で表現される知識の取扱いやシステムの成長という点では、いわゆる AI<sup>1</sup>的手法が優れているが、ダムによる洪水調節が定量的データ処理と定性的情報処理の両者を統合して行わなければならないことから、AI 的手法のみにたよってシステムを構築しようという試みは現実的でない。本研究では、特にこの点に注意し、定量的情報を数学的アルゴリズムに基づいて処理する手続き型知識システムと、ダム操作規則のように言語形式で表される知識や実務者の経験といった定性的な知識に基づく処理を行う推論システムとの両者が、オンラインで結合され、互いに情報の交換を行いながら総合的な洪水制御支援を行う環境を提案する。さらに、推論システムの設計においては、取り扱う知識が定性的・断片的であり、多量であること、出水の経験等により追加・更新されることを考慮し、取り扱う問題を複数の部分問題に分割し、推論システムの中に各部分問題を処理することのできる独立した知識システムを複数存在させる構造を採用する。以上のように、上位レベルでは、手続き型知識システムと推論

---

<sup>1</sup>Artificial Intelligence, 人工知能

システムの協調、下位レベルでは推論システム内部の知識システム群による協調を軸とすることによって、洪水制御の実状に即した支援を行いうる環境を構築することを試みる。

## 2.2 洪水制御のための貯水池操作の現状と課題

### 2.2.1 洪水調節ダムの操作方式

現在、洪水調節を行うダムの操作は、河川法に基づいて各ダム毎に定められた操作規則に基づいて行われている[1]。操作規則に定められている操作の方針は個々のダムによって異なるが、事前の洪水調節容量の確保の方法と洪水中の流量の調節方法に分けて考えると代表的な方法は限られてくる。

事前に洪水調節のための容量を確保する方法は、次の3種類に大別できる[2]

1. 制限水位方式…洪水発生のおそれのある夏の一定期間、ダムの水位を下げて洪水調節容量を確保する方式である。
2. サーチャージ方式…常時満水位の上にサーチャージ水位を設定し、この水位差の分を洪水調節容量として年間を通じて確保しておく方式である。
3. 予備放流方式…洪水の発生が予想されるとき、洪水発生以前に貯水量を減少させ、洪水調節容量を確保する方式である。

また、上記3方式を組み合わせる洪水調節容量を確保しているダムも多い。1., 2. は、洪水が生起する差し迫った可能性の有無に関わらず一定期間容量を確保している点で操作は容易である反面、貯水池容量の効率的利用といった点からは3. に劣る。3. は、降雨・流出予測を正確に行うことができれば、貯水容量を最も有効に利用できる方法であるが、洪水生起以前にそれをもたらす降雨を正確に予測する事が困難であること、我国の河川は地形勾配が急峻で降雨から流出までの時間が短い短時間で貯水量を減少させなければならないことから操作は難しい。この点に関して、竹内[3]は降雨予測の精度と導入可能な予備放流方式の規模について定量化する試みをおこなったが、その中で「予備放流の正しい判断は、降雨予測とそれに基づく流出予測が、十分実行可能な時間的余裕を持って、高い精度で行われてはじめて可能である」としている。ダム完成年代別に洪水調節容量確保方式の変遷[2]をみると、予備放流を取り入れた洪水調節容量確保方式はやや減少傾向にあり、サーチャージ方式・制限水位方式および両者の複合方式が近年になって増加している。予備放流方式の実務者にかかる負担の大きさが、このような結果をもたらす1つの原因となっていると考えられよう。しかし、現在でも容量確保方式に何らかの形で予備放流を組み込んでいるダム貯水池は350ダムの内77ダム存在し[2]、その操作を支援するシステムの必要性は極めて高い。

洪水調節容量が確保された後、実際の洪水調節に入るが、洪水調節の方式は次の6つに分類される[2]

1. 全量貯留方式…文字どおり洪水の全量を貯留する方式。
2. 自然貯留方式…オリフィス型または越流型の放流口を利用して、貯留量の増減によって放流量を自然に調節する方式。



3. 一定開度方式 ... ゲートを一定開度に保つ方式.
4. 一定量放流方式 ... 流入量に関係なく、つねに一定量を放流する方式.
5. 一定率放流方式 ... 流入量の一定の割合を放流する方式.
6. 一定率一定量放流方式 ... 4 と 5 を組み合わせた方式である.

以上の内、1, 2, 3の3方式は、洪水期間中ほとんどゲート操作は必要ないが、4・5・6の3方式は、洪水期間中に頻繁なゲート操作が必要になる。ダム完成年代別の洪水調節方式の変遷をみると、ゲート操作の不要な調節方式、特に自然調節方式のダムが1981年以降急増している。このことは、洪水期間中のゲート操作（放流量の変更）の困難さを物語っているともいえる。しかし、我国のダム貯水池の容量の小ささを考慮すれば、ゲート操作を頻繁におこなって洪水調節の効率性をあげることが望ましいことにかわりはなく、そのためには洪水調節に関わる意思決定を支援する環境を整備することにより操作の安全性・確実性を満足できるレベルまで引き上げることが急務である。

### 2.2.2 最適操作 vs. 知識ベース型操作 vs. 現行操作

洪水時の貯水池の操作あるいはその支援の方法には2種類のアプローチがある。一つは、数値計画法に基づく実時間最適操作手法であって、DP理論を用いる方法を中心に非常に多くの研究がなされており、これらのレビューは、文献[4]、[5]に詳しい。もう一つは、AI技術を利用した貯水池操作あるいはその支援手法であって、本章で展開しようとしている方法論もこの範疇に属する。

実時間最適操作手法は、貯水池システムへの入力の不確かさを放流量決定過程に反映させながら、予め設定した制約条件を満足しつつ目的関数を最適化するよう時々刻々放流量を決定していくものであり、入力の不確かさの取扱いに応じて確定的なDPを用いる型紙方式<sup>2</sup>や確率DPによる適応制御方式がある。もちろん、入力の不確かさをどういう方法で評価するにせよ操作の方針をどうするかが最適操作の大前提であって、洪水制御問題に関して貯水池群の配列に応じた評価関数の設定方法[6]や多ダム・多評価地点系における評価関数の設定と系の分割化基準[7]に関する検討や水量だけでなく水質のコントロールも含めた操作方針の定式化[8]も行われている。また、近年の短時間流出予測手法の進歩を取り入れ、観測情報と入力の確率的予測情報の有効利用を念頭においた操作方法も提案されている[9]

ところで、いわゆる実時間最適操作手法は、以上見てきたように与えられた条件（目的と制約条件）を完全に満足する放流量が決定でき、最適化の過程で入力の予測情報特に平均値のみならずその精度まで考慮できるという点で非常に優れた成果であるにも関わらず、現在まで実際の貯水池操作に用いられた例を筆者は知らない。もちろん、学問的成果が実社会で役に立つようになるまでにそれ相当の時間がかかることはいうまでもない。特に、貯水池の適応制御に関する技術は豪雨出水のメカニズムに関する知見とそれをもとにした予測技術と密接に関連しており、これら技術も発展途上にあることを考えると、適応制御方式が実際の貯水池操作の場面で活用されるようになるまでに時間がかかることも頷けよう。しかし、DP理論の貯水池操作問題への応用が提案されてから既に30年近くが経過する今日まで、実際の貯水池操作にその利用が試みられてこなかったのは単

<sup>2</sup> 予めいくつかの流入量ハイドログラフに対する最適放流量系列を求めておき、実際の洪水時には近いパターンを選択し修正を加えながら放流量を決定していく方法

に時間的な問題だけではない。一つには、貯水池そのものの存在価値に関する考え方が関係している。洪水の調節を行うダム貯水池は、その計画段階において果たすべき機能が詳細に検討されており、これに基づいて洪水時の操作規則が定められる。したがって、洪水を制御するダム貯水池の存在意義は、計画時に評価された機能を発揮することと言い替えれば操作規則に定められた方針を遵守することにあるとする考え方である。このことは、貯水池操作の責任問題とも関連し、適応制御方式と現行方式の間の溝として残っている。計画操作と実操作さらに適応制御の関連について、稲田[10]は、操作規則による操作を通常操作とし、計画規模を上回るような洪水に対しては最適操作を用いるべきであるとして、両者の淀川流域への適用を通じてその関係を議論している。しかし、計画規模を上回る洪水はそう頻繁に起こるものではなく、通常の操作において全く経験しない方式を超過洪水に対してスムーズに適用できるかどうかは現実問題として疑問が残るところである。もう一つの問題は、一定の数式で表現される最適化条件に対する社会的なコンセンサスが確立されるかどうかである。適応制御の場合、操作方針は評価関数と制約条件によって示され、そのアウトプットである放流量系列は制御対象となる洪水ごとに、また、その時点で利用可能であった情報によって異なり、予めどのような放流がなされるのかわからないといった特徴がある。したがって、計画対象となる洪水に対してこのような放流を行うと予め明示する現行の方式に比べ操作方針が理解されにくいし、各時間断面での放流量決定のロジックを説明しづらいといった点があり、この点についても操作の責任問題と絡めて社会的な合意を形成する必要がある。最後の問題は、実際の貯水池操作が単に放流量を決定すればすむという問題ではないことに関連している。すなわち、放流量の変化は下流地点への広報や関係機関への通知を含む様々な業務を伴う。したがって、現実の操作を念頭におくならば、放流量を変更する時間間隔や変更の頻度についても考えなければならない。

以上、洪水時の貯水池操作に関して主として適応制御方式と現行操作方式の対立の原因について考えてみたが、それでは、現行の操作方式すなわち計画洪水を念頭において作成された操作規則に基づく操作は、十分な信頼性をもって行われているのであろうか。残念ながら答は否である。現行操作方式においても様々な難しさがあることが指摘されているし[11]、なによりも2.2.1で見たように自然調節方式のダム貯水池が近年増加しているという事実もこの点を物語っているといえよう。洪水の観測技術・予測技術の進歩にしたがい、本来、容易になっていく筈の貯水池操作が、逆に、徐々に困難視されはじめ、操作の不要なダム貯水池が指向されるというのはいかなる事態であろうか。筆者は、この問題は、観測・予測技術の進歩の成果を貯水池操作に役立てるための方法論が主として適応制御方式によってのみ示されてきたことに関係していると考えている。降雨や流量の確率予測情報の利用に関しては、いわゆる最適操作手法が理論的にも明快な回答を提示してきているにも関わらず、上述したように実管理への導入には至っていない。同時に、その中で提案されている観測・予測情報の有効利用のための技術も実管理への導入には至らず、これら情報の利用方法はその場その場の人間の思考にまかされるというのが現状である。ところが、洪水現象の観測・予測技術の進歩は新たに大量の利用可能な情報を作りだしている。かくして、貯水池操作を行う実務者は、大量の情報を自分の頭の中で処理して総合的・即時的な判断を行わなければならない、その負担が操作を困難視させる事態を招いたと考えられる。

本研究は、このような事態を現在貯水池操作が直面する問題であると考え、この一解決策として多種多量の観測情報・予測情報の処理を支援する技術を、現行の操作とそれを行う人間の存在を視野に入れつつ開発しようとするものである。理想的には、豪雨・流出の物理構造を基にした確率

予測手法の能力を最大限活用しつつ貯水池容量を最も効率的に利用できる適応制御方式が望ましいことはいうまでもない。ここで開発する貯水池操作支援知識ベースシステムは、特定の条件に対して最適な操作方針を作り出すものではないし、予測情報の精度を数学的に操作に反映するものでもない。しかし、貯水池操作支援知識ベースシステムは、情報利用の論理を人間の思考過程に準じた方法で記述でき、豪雨・流出の観測や予測など洪水時の貯水池操作に関する周辺技術の進歩に対応して、情報利用の論理を更新していくことができるという特徴を持っている。したがって、ここで開発するシステムに操作方針として数理計画的な方針を知識ベースに取り込めば、ある程度の最適性の保証も可能である。実際、いわゆる型紙操作をファジイ理論を用いて実現している例もある[12]。筆者は、以上の点から、貯水池操作に対する知識ベースアプローチは、現行の操作と操作の理想的な形である適応制御方式の橋渡しとなる役割を担っているものととらえている。そこで、まず、現行操作方式に立脚した形で貯水池操作支援の枠組みを開発することで現在行われている貯水池操作の信頼性を向上させるとともに、次に、その能力を成長させるための枠組みを開発することによって、新たに入手可能になった情報の利用を従来の論理の拡張として取り込む手法を提案する。

## 2.3 洪水制御支援環境の全体構成

洪水時におけるダム操作は、気象情報や流量・雨量といった情報から、ダム流入量や下流評価地点の水位を予測し、ダム操作規則にもとづいて今後の放流量を決定するという流れからなる。これら一連のプロセスを支援する環境を設計するためには、次の点に注意する必要がある。

1. 降雨・流量の予測のように主として数学的なモデル化の適した定量的かつ手続き的なデータ処理を行うシステムと、ダム操作規則や実務者個人の資質・経験といった言語形式で表される知識による情報処理を担当するシステムとがオンラインで結合され、自動的かつ高速に情報の交換が行えること。
2. データ収集システムから洪水制御支援システムへのデータ転送が自動的に行えること（大量のデータ入力を伴うシステムでは即時的な判断の支援は難しい）。
3. ユーザーが限られた時間内で必要な情報を正確に把握でき、ユーザーの意志が貯水池の制御に反映できるような対話型画面表示システムを備えていること。

以上の点を考慮して、図 2.1 に示す全体構成をとることにする。推論環境管理システム（以下 IEMS<sup>3</sup>とする）は、データ収集システム（以下 DAS<sup>4</sup>とする）から新たなデータが送られてきた時点で、推論システム（以下 IS<sup>5</sup>とする）が推論を実行する環境を整える。IS は、転送されてきた流量、水位データをもとに放流量管理ルール群にもとづいて推論を行い、推薦する放流量を決定する。推論の過程で流量などの予測値が必要になればユーザー（実務者）にその旨を通知するとともに、手続き型情報処理システム（以下 PDPS<sup>6</sup>とする）を呼び出す。PDPS は、収集されたデータをもとにダムへの流入量、下流地点の流量・水位、雨量、台風の進路などの予測を行うソフトウェア群から

<sup>3</sup> Inference Environment Management System

<sup>4</sup> Data Acquisition System

<sup>5</sup> Inference System

<sup>6</sup> Procedural Data Processing System

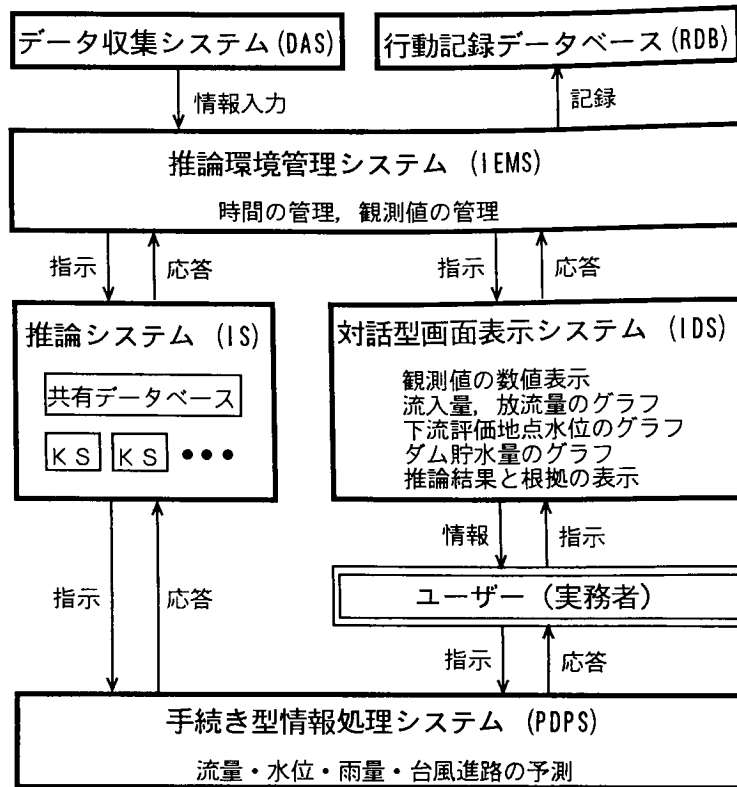


図 2.1: 協調問題解決型洪水制御支援環境の全体構成

なり、計算結果を IS に返す（この IS と PDPS のやり取りが上で述べた「協調」の后者である）。IS は返された情報を用いて推論を続行する。推論が終了すると IEMS は観測値と計算 推論の結果を行動記録データベース（以下 RDB<sup>7</sup>とする）に記録するとともに、対話型画面表示システム（以下 IDS<sup>8</sup>とする）に情報を表示するよう指令を出す。IDS は与えられた情報をもとに、流入量・放流量・下流評価地点の水位 ダム貯水量のグラフおよび数値等を表示する。このとき、ユーザーの要求があれば、提示した推薦放流量の根拠を明示したり、放流量を変更することが可能である。以上で1回の支援サイクルが終了する。

本環境は、PDPS を IEMS, IS, IDS とは異なる CPU 上に構築することにより、処理負荷を分散させ高速な支援情報の提供を図っている。各河川管理所が流出予測等のソフトウェアを既に所有している場合は、PDPS 内の該当する部分を既存のソフトウェアで置き換えればよく、容易に既存のソフトウェアと「協調」する環境とすることが可能である。

<sup>7</sup> Recording Data Base

<sup>8</sup> Interactive Display System



## 2.4 推論システムの設計

洪水時の貯水池操作は、観測データによる現況の把握に始まり、予測情報の作成、貯水池操作規則の参照等様々な過程からなる。さらに、貯水池操作規則に基づいて放流量を決定する過程を考えても、洪水の各場面によって重視すべきデータの量や質が変化する上、実務者が判断しなければならない項目も変化する。したがって、単一の推論技法を利用するだけでは、総合的な意思決定支援を行うシステムは構築できない。しかも、2.2で述べたように貯水池操作のための周辺技術は発展途上にあり、これらを利用する技術である貯水池操作支援システムもその進歩に合わせて成長させ易いものである必要がある。そこで、本節では、貯水池操作に必要な情報の処理が規則参照と規則適用に当たって実務者がしなければならない判断とからなるという点に注意し、各判断を担当する知識システム群が協調して最終的な結論を出す協調問題解決型の推論システムを設計する。

### 2.4.1 推論システム (IS) 開発に用いる基本的な手法

#### プロダクションシステム

プロダクションシステムは、含意式によって知識を表現 利用しようとする推論方式でエキスパートシステムの構築に際して、最も広く用いられている [13] プロダクションシステムは、知識ベース（ルールベースともいう）、ワーキングメモリ（データベースともいう）、推論エンジンから構成されている。知識ベースはプロダクションルールの集合である。プロダクションルールとは、

$$\text{IF } A \quad \text{THEN } B$$

の形で知識を表現するもので、 $A$  は1つ以上の条件文から、 $B$  は1つ以上の実行文から成っている。ワーキングメモリは、推論対象の現在の状態を記述する事実情報を格納する部分であり、この中の情報とルールの条件部が照合され、マッチしたルールの適用により内容が書き換えられ、推論が進められていく。推論エンジンは知識ベースとワーキングメモリーを把握・照合し、推論を制御する部分である。

上記三者が相互関連して推論は次のように進められる。まず、ワーキングメモリー内に格納された事実情報をもとに、推論エンジンは知識ベース内を検索し、条件部が事実情報と一致するルールを選び出す。次に選び出されたルールの結論部が実行され、ワーキングメモリー内の情報が更新される。この一連の作業を認知-実行サイクルと呼び、1つの認知-実行サイクルで書き換えられた情報に関し、さらに適用すべきルールがないかが検索され、次のルールが適用されることにより推論が進められていく。

プロダクションシステムは人間の思考様式に似ていること、一つ一つのルールが簡単なこと、断片的な知識を利用可能にするなどの利点がある。しかし、一方では、ルール数が増えると処理速度が低下する問題やルール間の競合解消の問題がある。本研究では、後述するように複数のプロダクションシステムを利用する協調問題解決型の推論システムを設計することで、一つの知識ベースの扱う問題を限定し、ルール数の増加や競合解消の問題に対応している。

以下、複数のシステム間の協調を念頭に置いて本研究で設計したプロダクションシステムによる推論機構を示しておく。本研究で開発した推論エンジンは、知識ベースとワーキングメモリーの照合を次の順序で行う。

1. ワーキングメモリー内の最新の情報、つまり最後にワーキングメモリーに加えられたデータと適合する条件文をもつプロダクションルールの集合（競合集合）を生成する。
2. 競合集合に含まれるプロダクションルールが1つの場合は、そのルールを実行する。
3. 競合集合に含まれるプロダクションルールが複数ある場合は、ワーキングメモリー内で2番目に新しいデータを条件部に含むプロダクションルールを競合集合の中から選択し、新しい競合集合を生成する。
4. 競合集合に含まれるプロダクションルールが1つになるまで3を繰り返し、実行するルールを1つ決定する。

知識ベースとワーキングメモリーの照合は、実際には後述する必要変数の関係もあり、もう少し複雑であるが通常は上のようなになる。

また、プロダクションシステム内で用いる変数を次の4タイプに分類した。

- 入力変数 ... 推論を開始する際に必ず値を持つ<sup>9</sup>変数。推論は、この変数がすべて値を持って初めて開始される。よって推論システム (IS) を起動するということは、すべての入力変数に値を代入することである。
- 出力変数 ... 推論開始時には値を持たず、推論終了時に値を持つ変数。推論は、この変数がすべて値を持ったときに終了する。
- 必要変数 ... 推論過程において必要となったときにのみ値を持つ変数。通常は値を持たないまま推論を終了する。仮にこの変数の値を用いないで競合集合を作成したとき、競合集合内に含まれるプロダクションルールが1つもなくなってしまう場合、共有データベースにこの変数の値が書き込まれていたならそれを用いて競合集合を作る。また、共有データベースにも値がない場合は、他の知識システムに推論を依頼して推論結果が代入されることになる。
- 一時変数 ... 推論中に一時的に値を持つ変数。あるプロダクションルールによって値が代入され、あるプロダクションルールに使用される。特別な要求がない限り、代入された値がユーザーに示されることはない

この4つの変数のタイプは、ユーザーがルールを定義したときに設定しておく。それにより、ユーザーが入力変数の値をプロダクションシステムに与えると推論を開始し、推論終了時に出力変数の値を得る、というシンプルなプロダクションシステムの実行環境を設計できた。また、推論開始・推論終了・他の知識システムへの推論依頼など、プロダクションシステムにおける推論の流れそのものを制御する文はプロダクションルール内に記述されることがなく、断片的な知識でも知識ベースに次々に追加していくことが可能で、ill-structured な問題にも対応できるシステムとなった。

<sup>9</sup>「値を持つ」とは、その変数を含んだデータがワーキングメモリー内に存在するという意味である。

### 協調問題解決

協調問題解決とは、分散され疎に結合された知識源の集団による協調的な問題解決をいう[14]。ここで、知識源とは手続きやルールの集合で独立した処理の単位である<sup>10</sup>。特に、水問題のように大規模化・複雑化の進んでいる問題の解決やモデル化には協調問題解決の概念の持つモジュラリティの高さが不可欠である。例えば、推論機構にプロダクションシステムを用いた場合、ルール数が大きくなると推論速度の低下や競合解消方法の複雑化が問題となるが問題をいくつかの部分問題に分け、各部分問題を解決するための知識源を用意しこれらを協調させることで、1つの知識源の中の知識の保守やルール間の競合解消法は比較的容易になる。

本研究で開発した協調問題解決型推論システムの枠組みを図 2.2 に示す。ここでは、上で述べた知識源の具体的実現形態として図のような通信機能を持った知識システムを設計している。各知識システムは、各々担当する部分問題を処理するための知識ベースと推論機構を持った1個のエキスパートシステムであるとともに、他の知識システムとの通信のためのインターフェースを備えている。また、複数の知識システムが推論過程において同じ情報を必要とする場合に備えて全ての知識システムから参照可能な共有データベースを用意している。全体的な推論は、次の手順で進められる。推論開始の指示を推論システムが受けると当面の問題を解決するための知識システムが推論を開始する。推論中の知識システムが他の知識システムによる判断を必要とする場合や、処理を他の知識システムに引き渡す必要が生じた場合には、外部に向かってその旨のメッセージを発信する。メッセージを受け取った知識システムは、依頼内容が自分の扱える問題であれば自己の知識ベースに基づく推論を行い、推論結果を依頼元の知識システムに返すとともに、必要に応じて他の知識システムを起動する。以上の各知識システム内における推論と知識システム間の通信といった過程を繰り返すことにより、与えられた問題に対する解を得るための全体的な推論が進められることになる。この方法は、知識システムとしてプロダクションシステムに限らずファジィ推論やフレーム理論など様々な知識利用機構を用いることができるので各部分問題の性質ごとにそれに応じた推論機構を採用できる利点がある。

### オブジェクト指向

オブジェクト指向とは、データとそれに対する手続きを備えたオブジェクトと呼ばれる要素をプログラムの基本単位とするプログラミング技法である。オブジェクト指向の定義自体は文献[15][16][17]によって微妙に異なった書き方がされているが、Pinson and Wiener[16]による定義が明快である。すなわち、「カプセル化」、「抽象化」、「継承」、「多相性」の4つの性質を備えたコンピュータ言語をオブジェクト指向言語と呼ぶ。

カプセル化とは、各プログラム単位の持つデータを外部から直接アクセスできないように隠ぺいする事を意味しており、オブジェクトという概念がプログラミング単位のカプセル化をサポートしている。オブジェクトは上で述べたように固有のデータを持つが、このデータは直接外部からアクセスできず、データの内容を知るためには、予めそのオブジェクトに対して定義された手続き（メソッド）を呼び出す以外に方法はない。したがって、オブジェクトは外部からのアクセス方法のみ公

<sup>10</sup>実際には、Smith[14]は分散協調問題解決という言葉を用いて各知識源が異なるプロセッサ上に実現されていることを条件に挙げている。

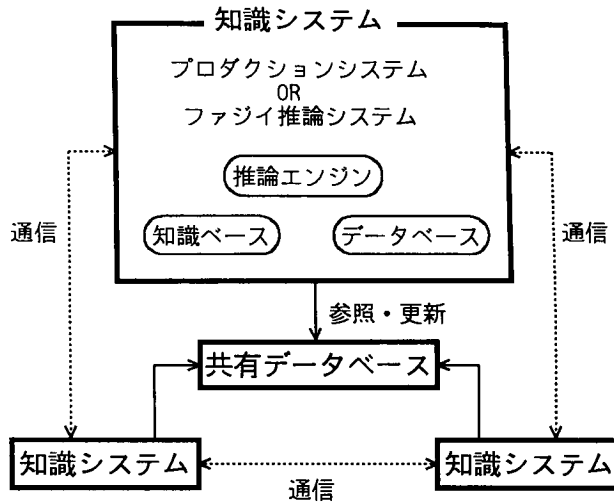


図 2.2: 協調問題解決型推論システム

開されたブラックボックスのようになり、作成しているシステムの変更や機能の追加が他の部分に大きな影響を与えることなくできる構造となっている。実際のプログラミングは、オブジェクトを定義していくことになるが、これは、似た性質を持つオブジェクトを一つのグループにまとめ、その共通仕様を記述することによって行う（共通仕様の定義、言い換えれば、オブジェクトの定義のことをクラスと呼ぶ）これが抽象化と言われる過程である。クラスを記述すれば、そのクラスによる定義に従うオブジェクトを複数発生させることができる。このオブジェクトをクラスのインスタンスと呼ぶ。例えば図 2.3 (a) では、クラスのインスタンスとして2つのオブジェクトがあるが、両者はそのデータの型や手続きは共通で、保持するデータの内容のみが違うオブジェクトとなっている。したがって、クラスはオブジェクトの持つデータとそれに対する手続きおよび外部からオブジェクトに対して手続きを依頼する方法（メッセージ）を定義するという点では、FORTRAN におけるサブルーチンや C における関数と似た概念である。ただ、サブルーチンや関数は手続きが主体であり、一つのソフトウェアの中で同じ名前の関数は1つしか存在しないが、オブジェクト指向におけるクラスの場合は同じクラスのインスタンスを計算機メモリー上に複数存在させておくことができるという点で、関数というよりは、手続きも含んだ汎用的なデータ型であると考えた方が分かりやすい。

継承とは、クラスを階層的に定義できることを意味する（図 2.3 (b)）。図 2.3 (b) では、クラス B、C はクラス A のサブクラスとして定義されているが、これによりクラス B、C のインスタンスは、クラス A で定義された性質（保持するデータや応答可能な手続き）をすべて引き継いで持つことになる。したがって、クラス B、C のインスタンスはクラス A で定義された（クラス B、C では陽に定義されていない）メッセージに応答することができる。継承機能により、プログラムで表現する内容のうち、より一般的な性質を上位のクラスで定義し、特殊な性質を下位のクラスで記述するという段階的な構成をとることが可能になる。また、必要に応じて上位クラスで定義されている

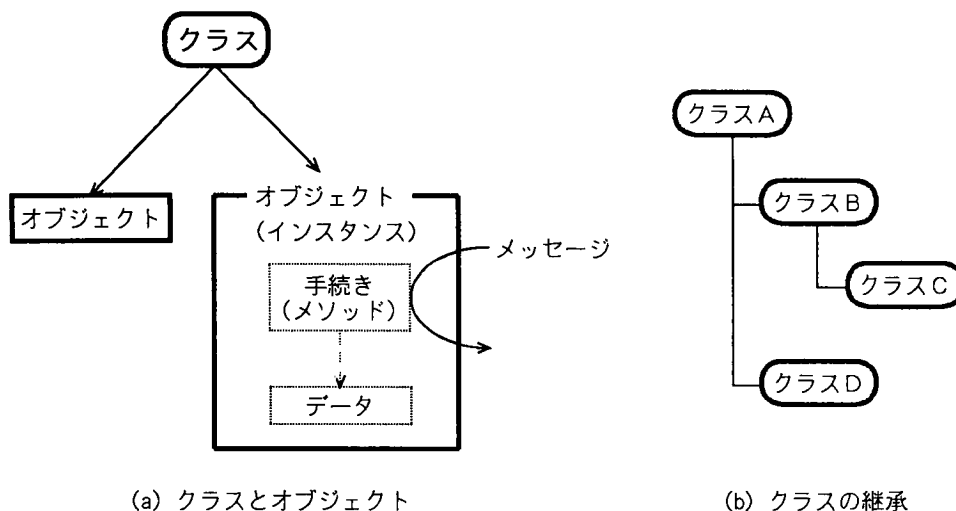


図 2.3: オブジェクト指向の概念

メッセージを下位のクラスで再定義することもできる。この機能が多相性である<sup>11</sup> 図 2.3 (b) で、クラス A で定義されているメッセージと同じ名前のメッセージをクラス B で定義したとすると、クラス A, B のインスタンスは同一メッセージを受け取ったとき各々その定義に従った別の処理をすることになる。多相性により、メッセージの名前に汎用性を持たせることができる。

### 協調問題解決とオブジェクト指向

オブジェクト指向の概念は、上で見てきたように単なるプログラミング手法にとどまらず、それ自体で 1 種の知識表現の方法であるとも考えることもできる。したがって、オブジェクト指向の知的情報処理における利用形態としては、

1. 知識表現の手段としてのオブジェクト指向
2. 知識利用機構の実現方法としてのオブジェクト指向
3. 1,2 の混合型

の 3 つのアプローチが考えられよう。

1 は、オブジェクトとクラス階層構造を用いて対象とする知識や情報の処理方法を階層的に記述していく方法である。例えば、オブジェクト指向によって提供されるクラス階層構造などは、フレームによる知識表現法と似通っている。実際、オブジェクト指向を段階的問題解決の手法と説明している例もある [16] しかし、知識そのものをオブジェクトをベースに記述していくと、知識とその利用手続きがプログラム上に混在することになり、知識とその利用のための手続きを分離するという方針からはずれることになる。その結果、知識の保守の容易さという観点からすると困難な点が残る。

<sup>11</sup>多相性はクラス階層構造内だけでなく同レベルのクラス間においても利用可能である。

2は、知識を利用するための機構をクラスを用いて定義する方法である。例えば、本研究で用いている推論システム（図 2.2 参照）では、各知識システムは推論方式が同じで知識ベースの内容の異なるオブジェクトとみなすことができるから、推論方式をクラスに記述し、そのクラスのインスタンスとして知識システムを発生させ推論および通信を行わせる方法を採用している。また、クラスの継承機能を用いれば、一般的なプロダクションシステムやファジイ推論の仕様を上位のクラスとして定義しておき、当面する問題に固有な手続きあるいはデータは、そのサブクラスとして定義することでシステムの記述が容易にできる。さらに、カプセル化によって各オブジェクトの入力出力仕様は厳密に定義されているから、プロダクションシステムやファジイ推論だけでなく、必要に応じて他の知識表現法や推論方法をシステムに追加していくこともできる。したがって、この方法は全体的な推論の進め方を考えれば、黑板モデル [18][19] とよく似た考え方ともいえる。

3の方法は、プロダクションルールやファジイ推論ルールによる表現が適している部分には2の方法で述べた知識システムを使い、それ以外はクラス階層やメッセージのやりとりによる表現を用いる方法である。この方法は、知識の保守ということをある程度犠牲にすることになるが、非常に柔軟なモデル表現が可能になるため、人間行動のモデル化などに適している。

もちろん、上の2, 3に示した方法の分類は厳格なものではない。例えば、プロダクションシステムではルールから起動する手続きをオブジェクトのメソッドとして記述する必要があるが、厳密には3に属するともいえる。ここでは、特にモデル設計時の方針から上のように分類してみた。また、オブジェクト指向言語と呼ばれる計算機言語には、smalltalk, C++ などがあるが、本研究では Smalltalk-80 [17] を用いている。

#### 2.4.2 洪水制御支援のための推論システムの全体構成

推論システムは、現在の流量、下流地点の水位などの事実情報をもとに、知識ベースにもとづく推論を行い、推薦すべき放流量を決定する部分である。本研究では洪水時の貯水池操作規則の構造を念頭に置くとともに、知識の改正・追加や、洪水制御に影響を与える要因の追加を容易にし、今後システムが成長し複雑化することに対応できるよう、協調問題解決モデルを導入し、図 2.4 に示す5つの知識システムからなる推論システムを構成した（図 2.4 は天ヶ瀬ダムの管理を例にして示している）。

これら5つの知識システムのうち、ダム操作規則の参照を伴う情報処理については、ダム操作規則を知識ベースとして持つ知識システムが中心となって支援を行う。また、規則が実務者に要求する判断を支援する知識システムとして、それぞれダム流入量が最大に達したか、評価地点水位が最大に達したか、今後ダムに洪水調節を行う十分な空き容量があるかといった判断を支援する知識をそれぞれ知識ベースとして持つ知識システムを用意している。さらに、単位時間当りのダムの放流量の増減に関する制限事項を知識ベースに持つシステムは必要に応じて前4者による放流量の代替案に対し、増減量が適正かどうかの判断を支援する。

以上5つの知識システムが相互に協調することによって、支援情報を提供するための推論は次のように進められる。まず、ダム操作規則に明文化された範囲の放流量決定を行う知識システムが推論開始の指示を受けると、ルールベースに蓄えられた知識をもとに推論を行うが、その過程で、流入量最大、下流地点の水位最大、ダムの安全性、単位時間当りの放流量の増減限界、を判断する必要性が生じた場合、それぞれの知識システムに通信して推論を依頼する。依頼された知識システ

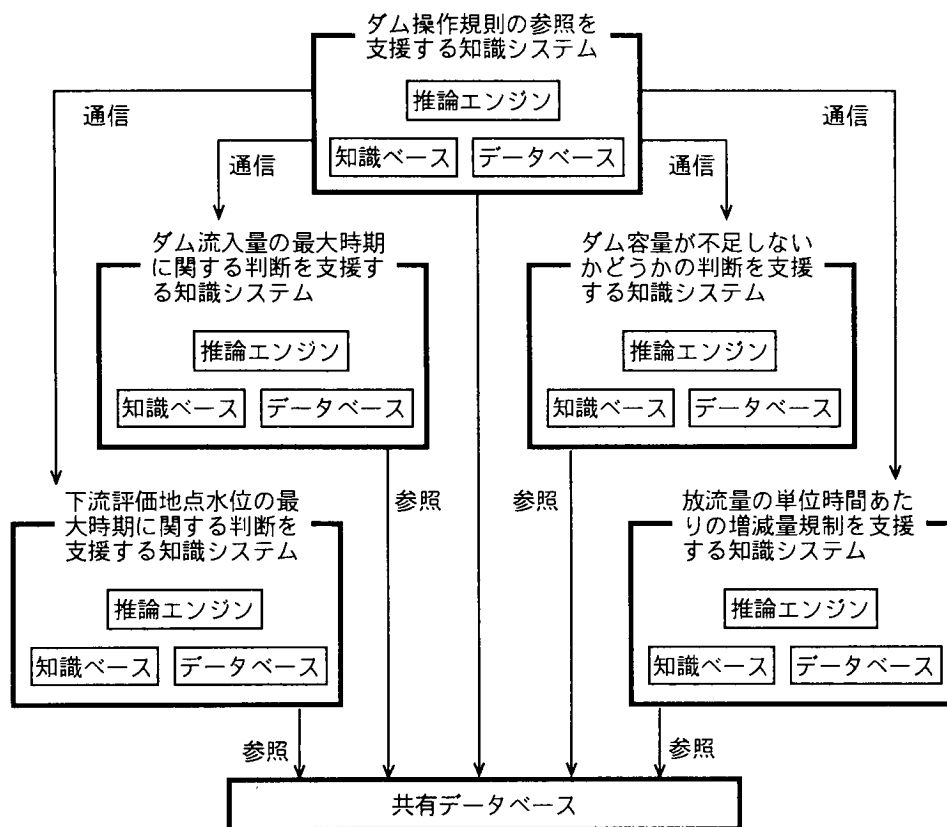


図 2.4: 推論システムの全体構成

ムは受け取ったメッセージおよび共有データベースの内容を参照して必要な情報を入手し推論を行う。予測計算が必要な場合には、先に述べたように、手続き型データ処理システムを呼び出すことができる。推論終了時には、依頼元である知識システムに通信し、共有データベースを介して結果を報告する。ダム操作規則による放流量決定を行う知識システムは、この結果を受けて推論を続行し、最終的に最適であると判断される放流量を決定して、推論システムは実行を終了する。以上の推論過程から分かるように、協調問題解決の概念を用いたことにより、知識の変更・追加の必要が生じた場合でも、該当する知識システムの持つ知識の変更あるいは新たな知識システムの追加を考えるだけでよく知識の整理・追加が非常に容易になっている。

## 2.5 適用と考察

### 2.5.1 適用流域と対象洪水

開発した洪水制御支援システムを、淀川流域宇治川に位置する天ヶ瀬ダムの管理に適用し、その適用性と問題点について検討を行う。対象となる流域は、図 2.5 に示すように、天ヶ瀬ダムへの流入部から木津川・桂川との三川合流を経て枚方に至る部分である。適用洪水は、1982 年の 10 号台

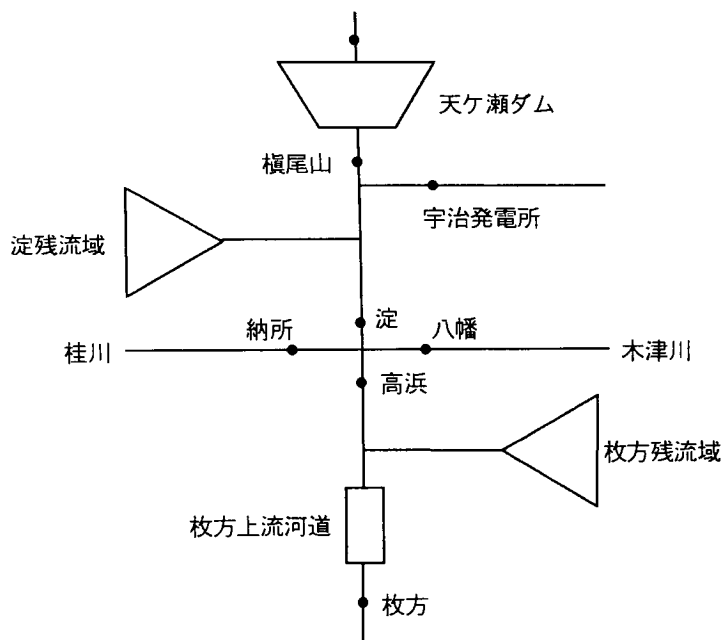


図 2.5: 対象貯水池システム

風によるものである。1982年10号台風は、7月24日3時に北緯15度東経157.8度の海上で熱帯低気圧から変化したもので、8月2日15時に能登半島の北の日本海上で温帯低気圧に変わるまでに、31都道府県に被害を与え、死者・行方不明者95人を出すという非常に大規模な台風である。しかし、天ヶ瀬ダムにおいては洪水制御が適切に行われ、被害を未然に防いでいる[21]

適用にあたって、天ヶ瀬ダムへの流入量、宇治川発電所の放流量、および桂川からの流入量として納所地点の流量、木津川からの流入量として八幡地点の流量は、テレメータ値を用いている。また、枚方上流河道は、次の貯留関数モデルによった[20]

$$S(t) = K Q^P(t) - T_a Q(t) \quad (2.1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (2.2)$$

ここに、 $S(t)$ 、 $Q(t)$ 、 $I(t)$ はそれぞれ時刻 $t$ での貯留量、流出量、流入量であり、パラメータの値は、 $K = 150.0$ 、 $P = 0.60$ 、 $T_a = 0.0$ 、また遅滞時間は0時間を用いる。さらに、淀残流域からの流入量は、横尾山、宇治発電所および淀地点の流量から逆算して求めた。枚方残流域からの流入量は、枚方地点の流量のテレメータ値をもとに、枚方上流河道の貯留関数を逆算することにより、河道への流入量を求め、これと三川合流地点の流量と比較することにより推定した。

### 2.5.2 支援環境設計過程における洪水管理モデル

本研究で開発した洪水制御支援環境は、時々刻々得られる雨量、流量などの情報をもとに、あらかじめ設定されたルールにもとづいて、各時刻でのダムの放流量の決定を支援するシステムであり、



河川管理の現場での洪水管理業務においては、図 2.1 に示す構成で運用されることを想定している。しかし、支援環境の開発過程においては、データ収集システム (DAS) と、決定されたダム放流量を受けて下流地点の流量・水位を再現して新たなデータを作り出す部分とはシミュレーションによらなければならない。そこで本研究では、洪水追跡シミュレータ・データ収集シミュレータ・手続き型情報処理システム (PDPS) 行動記録データベース (RDB) を SONY Tektronix エンジニアリングワークステーション 4132 上に設計し、推論システム (IS) と対話型画面表示システム (IDS) を SONY Tektronix 人工知能研究開発システム 4404 上に設計して、両者のデータの受渡しは RS-232C インターフェースによる自動的なファイル転送という形式にした。

まず、データ収集シミュレータでは、天ヶ瀬ダムの流入量データおよび洪水追跡シミュレータの結果を受けて、時間の経過にともない、現時点のダム流入量、ダム貯水量、枚方地点の水位のデータを、4404 上で稼働している IS に引き渡す。IS では、新たなデータが転送されてきたことを確認し、そのデータをもとにルールにもとづいた推論を行い推薦すべき放流量を決定する。洪水追跡シミュレータでは、決定された放流量をもとに、ダム貯水量の計算およびダム下流から枚方地点までの洪水追跡計算を行い、その結果をデータ収集シミュレータに引き渡す。以上のモデル構成は洪水の実現象の部分、推論システムの稼働している計算機とは別の計算機でシミュレートするとともに、テレメータによるデータ収集をファイル転送という形でシミュレートすることにより、現実の河川管理の現場との対応を図ったものである。本適用例では、ダムの放流量の単位時間当たり (15 分) の増減量がダム下流の榎尾山地点の流量に応じて制限されることから、放流量管理のための推論は 15 分間隔で行うものとした。また、データ収集シミュレータからのダム流入量、貯水量、枚方地点水位の転送は、テレメータが 1 時間単位でデータを転送してくる場合と、15 分単位でデータを転送してくる場合を想定して、1 時間間隔と 15 分間隔の 2 通りで行うことにし、それぞれの適用結果を比較 考察することにした。

ダム放流量の決定に際しては、今後のダムへの流入量や基準地点での流量や水位の予測値を得ることが意思決定のための重要な情報になる (例えば、流入量が最大に達したか、あるいは、今後の洪水制御に対してダムの調節容量に余裕があるかどうかなどの判断は、流量予測の結果と現在までの流量の経緯から実務者が総合的に行っているのが現状であろう)。したがって、ダム放流量管理ルールに流量の予測値を用いたルールを加えるためには、データ収集、洪水追跡のモデルの他、過去の雨量・流量情報をもとに、推論システムの要求する流量予測値を計算するシステムを構成しなければならない。流量の予測に関しては種々の方法が提案されているが、ここでは簡単のため、流量予測シミュレーションを行うことにする。

流量予測シミュレーションの方法は、現在より  $m$  時間後すなわち時刻  $n+m$  ( $n$ : 現在時刻) の流量予測値  $x_{n+m}$  を、その時刻の実測流量  $q_{n+m}$  と、正規分布  $N(0, \sigma^2)$  に従う乱数  $v_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) を用いて次式で求めるものである。

$$x_{n+m} = q_{n+m} + \sum_{i=1}^m a^{i-1} v_i \quad (a: \text{定数}) \quad (2.3)$$

このとき予測値  $x_{n+m}$  の分散は、 $v_i, v_j$  ( $i \neq j$ ) がそれぞれ独立であることに注意すると、

$$\text{Var}[x_{n+m}] = \sigma^2 \sum_{i=1}^m a^{2(i-1)} \quad (2.4)$$

$$Cov[x_{n+k} \cdot x_{n+l}] = \sigma^2 \sum_{i=1}^k a^{2(i-1)} \quad (\text{ただし } k < l) \quad (2.5)$$

したがって、 $x_{n+k}$ 、 $x_{n+l}$  の相関係数  $\rho_{k,l}$  ( $k < l$ ) は、

$$\rho_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^k a^{2(i-1)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k a^{2(i-1)} \sum_{i=1}^l a^{2(i-1)}}} \quad (2.6)$$

となる。本研究では、 $a = 1$  として、

$$\rho_{k,l} = \sqrt{\frac{k}{l}} \quad (2.7)$$

とし、 $\sigma = q_n/10$  とした。以上の方法を用いると各予測値の間には一定の相関関係があることになる。

以上のように、流量予測シミュレータを設計すると、予測精度を制御できるため、予測精度とルールとの関係を分析することができ、予測精度に応じた推論のためのルールを検討するのに適している。

### 2.5.3 貯水池操作規則をもとにした知識構成

本研究では、操作の基本になるダム操作規則として、天ヶ瀬ダムの操作規則 [20] を基に以下のものを用いている。

1. 台風が近畿地方に接近する恐れがあり、北緯 28° に達したと想定され、しかも天ヶ瀬ダム流域に総雨量 200mm 以上の降雨が予想されるときは予備放流<sup>12</sup>を行う。
2. 台風が近畿地方に接近し、北緯 30° に達したと想定され、しかも天ヶ瀬ダム流域に総雨量 150mm 以上の降雨が予想されるときは予備放流を行う。
3. ダムへの流入量が  $840\text{m}^3/\text{s}$  以上の時は、 $840\text{m}^3/\text{s}$  を放流する。
4. 枚方地点の水位が警戒水位 (4.5m) 以上の時は次による。
  - (a) 流入量が  $840\text{m}^3/\text{s}$  を越え、最大に達するまでは、 $840\text{m}^3/\text{s}$  の流水を放流する。
  - (b) 流入量が最大に達した後で枚方地点の水位が最高に達するまでは  $160\text{m}^3/\text{s}$  の流水を放流する。ただしこの調節(「二次調節」)を行うために必要なダム容量が不足すると予想されるときには、二次調節開始時刻を遅らせることができる。また二次調節中にダムの容量が不足すると予想されれば、二次調節を止めることができる。
  - (c) 枚方地点の流量が最大に達した後は、 $840\text{m}^3/\text{s}$  を上限として放流量が流入量に等しくなるまで放流する。

<sup>12</sup>天ヶ瀬ダムの予備放流には、第1予備放流と第2予備放流の2種類があるが、今回は第1予備放流 ( $600\text{m}^3/\text{s}$  以内の放流で貯水位を第1予備放流水位である 64.8m まで低下させるもの) のみを考慮した。

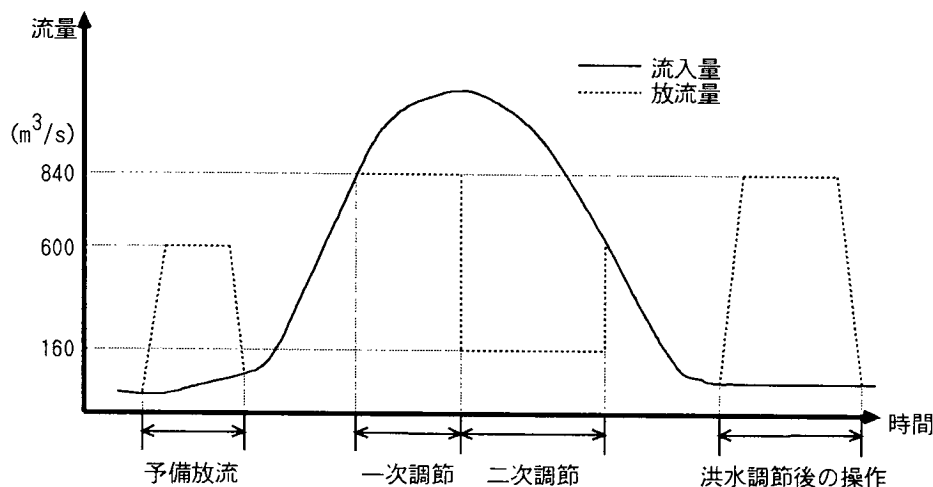


図 2.6: 天ヶ瀬ダムの洪水調節方針

5. 1 および 2 にあてはまらないときは、放流量が流入量に等しくなるまで放流する。
6. 15 分間の放流量の増減は別に定める値よりも小さい変化にしなければならない。ただし、4.(b), 4.(c) の場合はこれによらない。
7. 洪水調節の後において、ダム貯水位が制限水位 (72.0m) を越えているときは、 $840\text{m}^3/\text{s}$  以内の放流を行い、24 時間以内に制限水位まで低下させるものとする。

以上の規則の概念図が図 2.6 である。また、ダムからの放流量を変更すると、流水の状況に著しい変化が生じることもあるため、放流量を決定して直ちにその放流量に移行できるものではなく、関係機関への放流連絡やダム下流への警告等を行う必要がある。そこで、そのために要する時間を 30 分と仮定し、推論において決定した放流量に移行するのは 30 分後とすることにした。

放流量の決定において、実務者の判断の必要となるのは、ダム流入量が最大に達したか、枚方地点の流量が最大に達したか、ダム容量が不足する可能性があるか、の 3 点である。これらの判断は、実務者が降雨・流量 (水位) の観測値および予測値という定量的情報に、そのときの状況という定性的情報を加えて行うものであり、2.2 に既に述べたように個々の実務者の資質や経験に負うところが大きい。本研究では各知識システムの知識ベースにおいて、次のように判断ルールを設定した。まずダム流入量が最大に達したかどうかの判断は、一定時間毎にデータ収集システムから得られるダム流入量の観測値が、5 時間後までの予測値 (1 時間単位) の全ての値よりも上回った場合に、流入量が最大に達したと判断することにした。次に、枚方地点の水位が最大に達したかどうかの判断についても流入量最大の判断規則と同様に、5 時間先の全ての予測値よりも観測値が上回った場合に、水位が最大に達したと判断することにした。ここで 5 時間としたのは、予測値の精度を検討するための第一段階としてである。そしてダム容量が不足する可能性があるかどうかの判断の規則は、実験的に次の 3 通りの考え方をそれぞれ採用して、それぞれの規則によるシステムの実行結果の違いを見ることにした (ただし、推論を行う時刻から 30 分先までは前回、前々回の推論で放

流量が決定されている)。

1. 二次調節前 推論時刻の30分前から5時間先までの間に二次調節を行うとし、流入量には予測流入量を適用して、5時間先までのダムの貯水量が有効貯水量 ( $2.0 \times 10^7 m^3$ ) をこえるとき、ダム容量が不足する可能性があると考える。

二次調節中 二次調節を今後1時間続けるとしたときに、ダムの貯水量が有効貯水量を越えるとき、ダム容量が不足すると考える。

2. 二次調節前 推論時刻の30分前から二次調節を行うとして、15分間隔でダムの貯水量を計算し、それが有効貯水量を越える直前の予測流入量が  $840 m^3/s$  以上である場合、または  $840 m^3/s$  以下であっても有効貯水量を越える時刻が推論時刻から2時間30分以内であれば、ダム容量が不足する可能性があると考える。

二次調節中 1と同様で、1時間続けるところを2時間で行う。

3. 二次調節前 2と同様の方法で、2時間30分の所を1時間30分で行う。

二次調節中 1と同様の方法で行う。

#### 2.5.4 適用結果と考察

前項で示した知識ベースを用いて本支援システムによる放流量決定を1982年8月1日12時から8月3日0時までについて行った。画面表示システムの出力結果の1例を図2.7に、制御結果の一例を図2.8に示す。また、各ケースに対する適用結果をまとめたものを表2.1に示す。表2.1中、Rule No. は2.5.3において設定したルールの番号を、Case No. 1はデータ収集時間間隔が1時間、Case No. 2は15分間隔であることを示す。なお、本研究では既存手続き型知識システムに対応する流出予測システムとして乱数発生による流量予測シミュレーションを行っているため、各ケースとデータ収集時間間隔に対し4回づつ適用を行っている。表2.1中第3カラムのRun No. が同一ルール同一データ入手時間間隔での適用番号を示す。また、図2.8はRule No. 3でデータ入手間隔15分(Case No. 1)の第1回目の適用(Run No. 1)によるものである。

表2.1から、まず、1時間ごとに流入量・水位のデータが更新される場合(Case No. 1)を見ると、(Rule No. 1)では得られた水位を平均すれば他の2つのルールを用いた場合に劣りはしないが、これは1度だけ特に優れた結果が出た(Run No. 4)ためであり、その他の結果を見るとかなり枚方地点の水位が高かったり、貯水量がダム容量を越えたりする場合があります。決して良い結果とは言えない。このように水位を抑えきれない原因としては、(Rule No. 1)では二次調節に入る際に5時間先までの貯水量を計算してそれをもとにダムの安全性を判断しているため、ダムの安全性に関しては安全側過ぎるルールであり、二次調節にはいる時間が実際にはいるべき時間よりも遅れがちであるためと考えられる。しかし一旦二次調節にはいると1時間先という比較的短時間までの貯水量でダムの安全性を判断しているため、二次調節を比較的長時間にわたって行うという性質があり、予測値が実測値を下回った場合などにタイミング良く二次調節に入れば、かなり良い結果が得られるのであろう。(Rule No. 2)(Rule No. 3)は、どちらもコンスタントな結果が得られている。これは、予め二次調節を続ける時間を設定しておくのではなく、状況に応じて二次調節の可能な継続時間を予測し、それに基づいて判断を行っているためであろう。全体的に(Rule No. 3)の方がよい結果が得られて

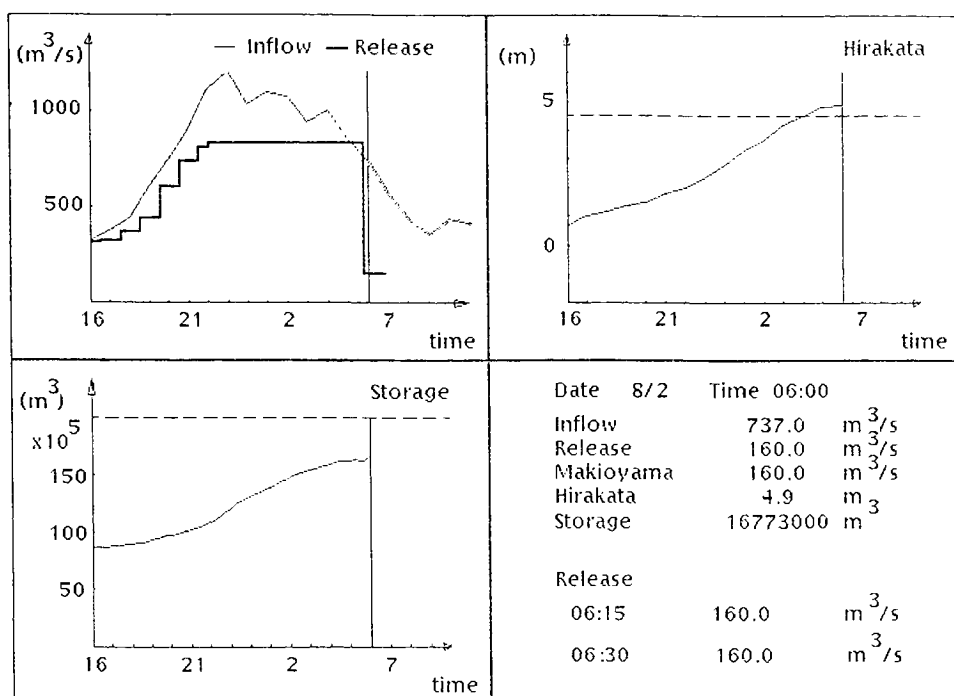


図 2.7: 画面表示システムの出力例

いるのは、(Rule No. 3)の方が(Rule No. 2)よりも二次調節に入りやすく出にくいからである。しかし、二山洪水等の様々な流出形態に対処するためには、今後、更に知識ベースのレベルアップを図っていく必要がある。

15分ごとに流量・水位のデータが更新される場合(Case No. 2)について見ると、いずれのケースにおいてもデータ入手が1時間ごとのものよりもよい結果が得られている。もちろん、これは洪水の現況がより正確に把握できるために他ならないが、同一ルールでもデータ入手間隔の違いにより制御結果がかなり異なる場合があり、今後データ入手間隔と制御の支援方法との関連を含めた知識の獲得を図る必要があることがわかる。

## 2.6 結語

近年の豪雨・出水の観測・予測技術に伴い貯水池操作の際に利用できる情報は多種・多様となりつつあり、観測・予測情報を貯水池操作に有効利用する技術として、確率DPを中心とする適応制御アルゴリズムが提案されてきた。しかし、これらの方法は、貯水池容量の有効利用、確率的予測情報の利用などに優れた面を持つにも関わらず、実際の貯水池操作に利用されるにはいたらず、現在、洪水制御のための貯水池操作は各ダムについて定められた操作規則にもとづいて行われている。その結果、実務者は、大量の観測・予測情報を自分の頭の中で処理して、総合的・即時的な判断を行わなければならない。その負担が貯水池操作を困難視させる事態を招いている。本研究では、このような事態を現在貯水池操作が直面する問題であると考え、この一解決策として多種多

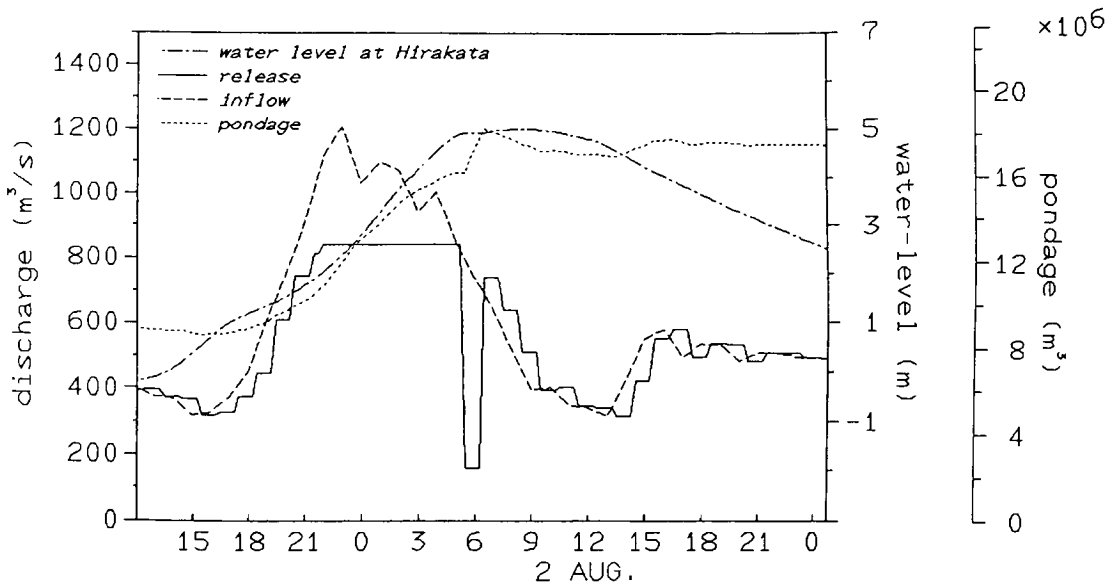


図 2.8: 制御結果の一例

量の観測情報・予測情報の処理を支援する技術の開発を、現行の操作とそれを行う人間の存在を視野に入れつつ試みたものである。

本章で得られた成果を以下に要約しておく。

1. 洪水制御のための貯水池操作の現状とこれまでに提案されてきた適応制御方式の関係について分析し、現在、貯水池操作が直面する問題を明らかにした。ついで、現在行われている操作方式に観測技術・予測技術の進歩の成果を活用して、貯水池操作の信頼性を高めるとともに、適応制御方式で示される理想的な方法と現行操作の橋渡しとなるシステムの必要性を明らかにした。
2. 洪水時の貯水池操作における情報の流れに留意し、洪水制御支援環境の全体構成を示した。この中で、推論システムと手続き型情報処理システムの協調関係を実現している。
3. 貯水池操作に必要な情報の処理が規則参照と規則適用に当たって実務者がしなければならない判断とからなるという点に注意し、各判断を担当する知識システム群が協調して最終的な結論を出す協調問題解決型の推論システムを開発した。また、個々の知識システムをプロダクションシステムを用いて構成した。
4. 開発したシステムを淀川水系天ヶ瀬ダムの管理に適用しその適用性と問題点を探った。特に、流量予測シミュレータを用いた検討では、予測精度が制御結果に与える影響が特に大きいことが分かり、今後予測値の利用に関する知識についてさらに深く考察を加えるべきであることが分かった。

また今後の課題として、

表 2.1: 3通りのルールによる制御結果の比較

Rule No.	Case No.	Run No.	Secondary Control			Maximum Pondage of Amagase Dam		Highest Water-level at Hirakata	
			time		period (min.)	time	pondage ( $\times 10^6 \text{m}^3$ )	time	water-level (m)
			start	end					
1	1	1	8:30	10:30	120	16:30	1.76	7:00	5.06
		2	7:30	8:30	60	16:30	1.72	7:00	5.06
		3	6:45	9:45	180	16:30	2.02	6:30	5.04
		4	5:30	7:15	105	7:45	1.98	8:30	4.95
	2	1	5:00	6:45	105	6:45	1.94	8:15	4.95
		2	.....	.....	0	5:15	1.56	6:45	5.05
		3	6:15	6:30	15	6:30	1.59	7:15	5.03
		4	6:15	7:30	75	7:30	1.77	6:15	5.01
	3	1	4:15	5:30	45	5:30	1.81	5:30	5.03
		2	5:15	5:45	30	5:45	1.75	5:45	5.04
		3	5:00	5:30	30	5:30	1.75	5:30	5.04
		4	4:45	5:15	30	5:15	1.75	5:15	5.04
2	1	1	5:00	6:00	60	6:00	1.79	6:00	4.99
		2	4:30	5:00	30	5:15	1.68	5:15	5.03
		3	4:30	5:15	45	5:15	1.74	5:15	5.01
		4	4:45	5:30	45	5:30	1.74	5:30	5.01
	2	1	6:30	6:45	15	6:45	1.64	8:15	5.05
		2	4:30	5:45	75	5:45	1.93	8:30	5.01
		3	5:30	6:30	60	6:30	1.84	8:15	5.00
		4	4:45	5:30	45	5:30	1.81	8:15	5.03
	3	1	4:30	6:00	90	6:00	1.91	8:30	4.98
		2	4:30	6:00	90	6:00	1.91	8:30	4.98
		3	4:30	5:00	30	5:15	1.68	8:00	5.03
		4	4:45	5:30	45	5:30	1.74	7:45	5.01

1. 流量予測情報を用いた判断支援のための知識構成法について、特に、予測モデルの精度との関係を考慮した統一的な手法を開発する必要がある、
2. 本章で開発した画面表示システムでは、判断の流れを明確に把握することができないので、これを容易にする支援情報の提供方法を開発する必要がある、
3. 予備放流や洪水終了後の操作を取り扱っていないので、これらを含む知識構成を行う必要がある、

が挙げられる。上記の課題については、次章で解決を図る。

## 参考文献

- [1] 建設省河川局開発課(監修):ダムの管理例規集 昭和60年版, 山海堂, p.34, 1985.
- [2] 大熊孝:洪水と治水の河川史, 平凡社, pp. 180-200, 1988.
- [3] 竹内邦良・林直人:降雨予測を利用した予備放流方式の実用化に関する検討—その1. 予備放流方式による洪水調節シミュレータの設計—, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-2, pp. 363-370, 1989.
- [4] Yakowitz, S.: Dynamic Programming Applications in Water Resources, Water Resources Reserch Vol.18 No.4, pp.673-696, 1982.
- [5] Yeh, William W-G.: Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review, Water Resources Reserch Vol.21 No.12, pp.1797-1818, 1985.
- [6] 高棹琢馬・瀬能邦雄:ダム群による洪水調節に関する研究(I) —DPの利用とその問題点—, 京都大学防災研究所年報, 第13号B, pp.83-103, 1970.
- [7] 高棹琢馬 池淵周一 小尻利治:多ダム・多評価地点系の最適操作に関する研究, 京都大学防災研究所年報 第21号B-2, pp.193-206, 1978.
- [8] 高棹琢馬・池淵周一・小尻利治:濁質水を考慮したダム制御に関する一考察, 京都大学防災研究所年報 第22号B-2, pp.167-178, 1979.
- [9] 張昇平・児玉好史・椎葉充晴・高棹琢馬:統計的二次近似によるダム貯水池群の実時間操作, 京都大学防災研究所年報, 第30号B-2, pp.299-321, 1987.
- [10] 稲田裕:貯水池群による淀川水系の最適洪水調節に関する研究, 京都大学学位論文, 1976.
- [11] 丹羽薫 廣瀬昌由 宮井貴大:ダム操作支援システムの現状と今後のあり方について, 水文・水資源研究におけるAI技術の利用に関するシンポジウム論文集, pp. 33-38, 1992.
- [12] 小尻利治・藤井忠直:知識ベースを用いた貯水池の実時間操作に関する研究, 土木学会水工学論文集第34巻, pp.601-606, 1990.
- [13] 例えば, 長尾真:知識と推論, 岩波書店, 1988.
- [14] Smith, R. G., and Davis, R. : Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Vol.SMC-11 No.1, pp.61-70, 1981.



- [15] Cox, B. J. : オブジェクト指向のプログラミング, 前川守監訳, トッパン, pp.37-48, 1988.
- [16] Pinson, L. J. and R. S. Wiener : Smalltalk : オブジェクト指向プログラミング, 羽生田栄一監訳, トッパン, 1990.
- [17] Goldberg, A., and Robson, D. : Smalltalk-80 言語詳解, 相磯秀夫監訳, オーム社, 1987.
- [18] Nii, H. P. : Blackboard Systems: The Blackboard Model of Problem Solving and the Evolution of Blackboard Architectures , The AI Magazine Vol.7 No.2 , pp.38-53 , 1986.
- [19] Nii, H. P. : Blackboard Systems: Blackboard Application Systems, Blackboard Systems from a Knowledge Engineering Perspective , The AI Magazine Vol.7 No.3 , pp.82-106 , 1986.
- [20] 建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所 : 淀川流水管理システム操作解説書, 1985
- [21] 高棹琢馬・永末博幸 : 淀川水系における洪水の予知・予報と今後の展望について, 第19回自然科学情報シンポジウム講演要旨集, pp.47-50 , 1982.

## 第 3 章

# 洪水制御支援環境へのファジイ推論の導入

### 3.1 概説

第 2 章では、貯水池の操作における多種多量の観測情報・予測情報の処理を支援する技術について、現行の操作とそれを行う人間の存在を視野に入れつつ考察し、協調問題解決型洪水制御支援環境を設計した。その中で、ダム操作規則がその適用に当たって実務者に要求する判断を効果的に支援するためには、降雨 流量予測情報をその精度に応じてどのように判断ロジックに組み込むかが重要なポイントであることがわかった。一方、流量の予測に関しては、様々な手法が提案されており、そのレベルも 1 つないし複数の予測ハイドログラフを示すだけのものから、平均値とその分散までを与える確率予測手法まで様々である。また、実際の貯水池操作の場面では、洪水の予測情報は直接的な意思決定の根拠として広く用いられているとはいえないのが現状である。したがって、洪水制御において予測を伴う意思決定を行う場面では、予測情報だけでなく観測情報、さらには、実務者の経験等多くの種類のデータや知識が用いられていると考えられる。その中には、知識そのものが曖昧な形式でしか表現できないようなものも含まれる。

本章では、これらの点に着目し、前章で開発した協調問題解決型洪水制御支援環境にファジイ推論を行う知識システムを導入することで、曖昧な知識の活用を図る。特に、実務者が予測情報を利用する場合に、その情報を提供するモデルの能力に応じてどのような判断論理を用いているかを分析し、統一的な形式で判断のための知識を生成する手法を提案する。合わせて、洪水の各場面で洪水制御支援環境が行う推論の流れをユーザーに提示する方法についても考察を加え、対話型画面表示システムを設計する。

### 3.2 洪水制御のための知識とファジイ理論

本研究では、洪水時の貯水池操作を支援するシステムをそれに携わる人間の存在を念頭において開発することをめざしている。既に、第 2 章では、洪水制御にともなう情報処理の性質を考慮し、手続き型データ処理システムと推論システムの協調および推論システム内部の知識システム群による協調を軸とする環境を設計した。この設計過程の中で、現行の操作規則に基づく放流量の決定を支援するためには、操作規則の参照作業の支援と操作規則に記述されている条件が現在成立するかどうかの判断の支援との 2 つが重要であることを指摘した。後者は、例えば「貯水池流入量が最

大に達した後」という表現に代表されるように、条件の成立を、現在までの観測情報だけでなく将来の状態に対する予測を踏まえて判断しなければならない項目である。これらの判断においては、流量等の予測情報を如何に活用するかが大きなポイントになる。ところで、洪水の際の流出予測手法には現在様々なものが提案されている。例えば、類似台風の抽出から降雨シナリオを想定して流出計算をすることでハイドログラフを得る方法[1]から、Kalman フィルタを用いる確率予測[2]や貯水池操作を意識した形式で予測情報を与える手法[3]などがある。また、実際のダム管理所でも、様々なレベルのものが用いられている。したがって、予測情報を含むデータから現在の状態を判断する場合には、利用できる予測モデルのレベルに応じた知識構成を考えておかななくてはならない。また、各ダム管理所でも徐々に能力の高い降雨・流出予測システムへの移行がなされていくであろうから、現段階の知識が用いるロジックと予測システムがレベルアップした場合の知識が用いるロジックとがある程度統一された形式で表現されていることが新システムのスムーズな受け入れのためには必要である。そこで、以下、貯水池流入量が最大に達したという事象の判断を例に取りながら将来の状況を含んだ判断を支援するための知識について、利用できる予測システムのレベルに応じて考えてみる。

1. 数値的な流量予測システムが利用できないようなレベルでは、判断に用いることのできる情報は、現在までの流量・雨量の観測値のみである。このようなケースでは、実務者は、観測値と判断すべき事象の間に過去の経験をもとに何らかの定性的な関係を想定して判断を行っていると考えられる。
2. シミュレーション的に将来のハイドログラフを与えるレベルの予測システムを用いる場合には、予測システムの出力値と現在までの観測データの推移とから判断を行うことになる。この場合には、用いている予測システムの能力に対する評価によって予測値と観測値の持つ判断根拠としての重要性が変化すると考えられる。
3. 確率予測システムが利用できる場合、特に、これらの予測情報の形式が例えば流入量ピーク生起時刻の確率分布を与えるレベル[3]の場合には、基本的には、このシステムの出力する確率をもとに判断を行うことになる。しかし、現行の貯水池操作では操作の各ステージで二者択一の判断を迫られ事後の修正は困難であるから<sup>1</sup>、与えられる確率がどの程度なら現時点で既に流入量が最大に達したと判断するのかといった点に実務者の思考が入らざるを得ない。この過程は、予測システムが出力する確率にそのシステムに対する評価と観測データを組み合わせたものと考えられる。

以上、利用できる予測情報のレベルに応じて、貯水池操作規則が実務者に要求する判断を支援するための知識の構造について考えてみた。いずれのレベルにあるにせよ予測情報と予測システムの能力に対する評価および観測データといった3種類の情報の組み合わせで人間の判断が行われていることがわかる。もちろん、これらの情報の組み合わせは確定的なものではなく、本質的に漠然としたものであることは容易に予想できる。したがって、これら3種類の情報要素の組み合わせとして判断支援のための知識を構成するにはファジイ推論手法が適していると考えられる。

<sup>1</sup>例えば第2章で扱った天ヶ瀬ダムの操作では、一旦二次調節に入った後再び一次調節に戻るといった類の修正は想定されていない。

1965年 Zadeh によって提案されたファジイ集合論[4]に始まるファジイ理論は、人間の行う情報処理の近似を与える手法として理論・応用両側面で発達し、様々な機械やプラントの制御に用いられるに至っている[5, 6, 7]。洪水制御に関連する分野でもファジイ理論を導入する試みは既に種々行われ、貯水池の放流量の決定にファジイ制御を用いる手法[9, 10, 11]や排水ポンプのファジイ制御手法[12]、貯水池流入量の予測にファジイ推論を用いたエキスパートシステム[13]等が提案されている。また、ファジイ理論を用いた流出予測手法も提案されている[14, 15]。

以上のように、ファジイ理論は複雑・大規模システムの制御において大きな成果を納めつつある。しかし、本研究では、2.2でも述べたように、洪水時の貯水池操作において意思決定を行う人間<sup>2</sup>の存在がある以上、制御に伴う判断論理を分かりやすい形で表現することが重要であると考え、制御の論理として直接ファジイ制御理論を用いることは避け、貯水池操作規則が実務者に要求する判断を支援する知識のモデル化をファジイ推論ルールを用いて行うことにする。

### 3.3 ファジイ推論を導入した推論システムの構成

本節では、2.4で設計した推論システムを構成する知識システムに新たにファジイ推論を行うものを導入する。既に、協調問題解決のための枠組みおよびそれを構成する知識システムの仕様は、2.4で得られているので、ここでは、採用するファジイ推論方法について触れ、洪水制御のためのファジイ推論ルールの自動作成手法およびファジイ推論システムとプロダクションシステム間の協調手法を開発する。

#### 3.3.1 ファジイ推論を行う知識システムの設計

ファジイ推論の方法は、前件部・後件部変数の性質に応じて種々の方法が提案されているが、ここでは、洪水時の貯水池操作において操作規則が実務者に要求するための判断に用いられる情報が降雨・流量の観測データや予測情報といった数値情報であることに注意し、菅野[16]が推論法1として紹介している方法を用いることにする。以下、本研究で用いる推論法の概略を示しておく(図3.1参照)

前件部が $x_1, x_2$ の2変数からなり、後件部変数が $y$ であるようなファジイ推論ルールは次の形式で表現される。

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_{i1}) \text{ and } (x_2 \text{ is } A_{i2}) \text{ THEN } y \text{ is } B_i.$$

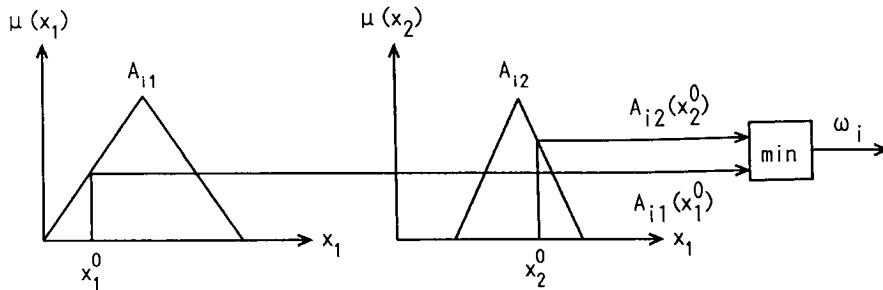
ただし、 $A_{i1}, A_{i2}, B_i (i = 1, \dots, N)$ は、それぞれルール $i$ における $x_1, x_2, y$ に対するファジイ集合であり、メンバーシップ関数 $\mu_{A_{i1}}(x_1), \mu_{A_{i2}}(x_2), \mu_{B_i}(y)$ によって特性づけられているものとする。また、 $i$ はルール数を表す。いま、このシステムに $x_1^0, x_2^0$ なる入力があったとき、この入力値に対する出力ファジイ集合 $B_0$ は、

$$\mu_{B_0}(y) = \bigvee_{i=1}^N [\mu_{A_{i1}}(x_1^0) \wedge \mu_{A_{i2}}(x_2^0) \wedge \mu_{B_i}(y)]$$

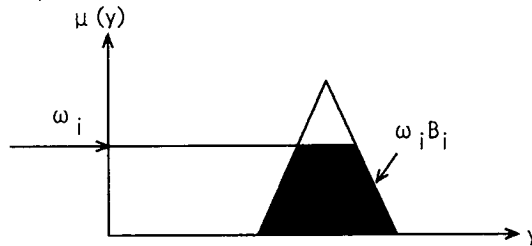
によって求められる。ただし、 $\mu_{B_0}(y)$ は出力ファジイ集合 $B_0$ を特性づけるメンバーシップ関数である。さらに、入力に対応する出力値 $y^0$ は、 $B_0$ の台集合の各要素のグレードを重みとする重み付き

<sup>2</sup>行った操作の責任を負う人間でもある。

(1) ルール $i$ の適合度 $\omega_i$ の決定



(2) 適合度 $\omega_i$ に応じたルール $i$ の結論集合の作成



(3) 全ルールに対する結論の合成

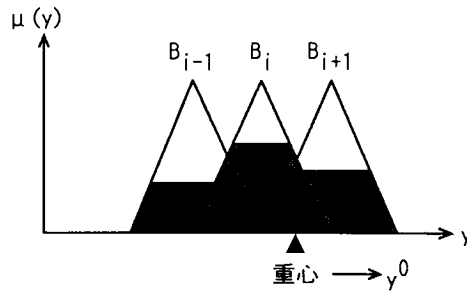


図 3.1: ファジイ推論の方法

平均,

$$y^0 = \frac{\int y \mu_{B_0}(y) dy}{\int \mu_{B_0}(y) dy}$$

で与えられる。

本研究では、上記方法において用いるメンバーシップ関数として3角形および台形を中心とする11種類の形状を取り扱えるファジイ推論システムを設計している。

### 3.3.2 洪水制御支援のためのファジイ推論ルールの形式とルールの自動作成

3.2でも述べたように、貯水池操作規則がその適用に当たって実務者に要求する判断を支援するためには、判断根拠となる観測・予測情報の重みを予測モデルの精度によって変化させながら判断を行うという論理が適している。一方、支援すべき判断項目は、例えば、貯水池流入量が既に最大

に達したかといった内容であり、判断項目そのものは直接ファジイ集合で表現できるものではない。そこで、本研究では、判断しなければならぬ項目の示す事象が生起していると考えられる確からしさを0～1の確信度で表し(1に近いほどその事象が生起したと考える度合いが強い)、この確信度を後件部変数とする。例えば「貯水池流入量が既に最大に達したか」という内容を判断する際には、この事象が生起したと考えられる確信度を直接推論することにする。このようにすれば、後述するように、一つの知識システムが出力した結果を推論システム内の他の知識システムが利用する際に確信度付きの推論を行うことが可能になり、推論の過程で生じた曖昧性を推論システムの出力する最終結論まで伝搬させた上で、決定を下すことができる。

さて、実際にファジイ推論を行う知識システムを設計する際に最も問題になるのは、ルールの作成法である。ファジイ推論ルールが本来関係が明確でない事象間の結び付きを記述するものである以上、ルール作成を実務者へのインタビューをもとに行うにしても、ルールの作成・変更を容易にする枠組みがなければ、システムの成長は期待できない。そこで、本研究では、ファジイ推論ルールの作成の際に、各条件が結論に対して持つ重要性を表す重みを導入し、これを実務者に決めさせることにより、自動的にルールを生成するシステムを作成した。以下、流入量最大時期の判断を支援する知識システムを例にとりてその概要を述べる。この知識システムでは、前件部変数として、予測モデルの精度に関する評価( $x_1$ )、5時間分の予測流入量の最大値と現在までの最大流入量に対する比( $x_2$ )、現在までの観測最大流入量の生起時刻からの経過時間( $x_3$ )、過去3時間の降雨量の変動( $x_4$ )を、後件部変数として流入量ピークが過ぎたと考えられる度合( $y, -1 \leq y \leq 1$ で1に近いほど流入量ピークが過ぎたと考える度合いが高い)を用い、ルールを次の形式で表している。

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_{i1}) \ \&(x_2 \text{ is } A_{i2}) \ \&(x_3 \text{ is } A_{i3}) \ \&(x_4 \text{ is } A_{i4}) \quad \text{THEN } (y \text{ is } B_i)$$

各変数のファジイ分割は表 3.1 (a) に示すものとする。本ルールは、予測モデルの精度に関する評価が高いときには、予測モデルによって得られた情報( $x_2$ )に重きをおいた判断になり、予測モデルの信頼性が低くなるにしたがって、その他の要因( $x_3, x_4$ )に重きをおいた判断になるという考え方をモデル化したものである。つまり、 $x_1$ は他の変数と異なり、 $x_2 \sim x_4$ の結論に対する影響の大きさを決める変数と見ることができる。そこで、ピークの前後を評価する変数を $\theta$ とし、 $x_2, x_3, x_4$ に対応するルール作成時のパラメータを $p_2, p_3, p_4$ とする。また、 $x_1$ の値によって変化する $x_2 \sim x_4$ の結論に対する影響の大きさを表す重み係数を $w_2, w_3, w_4$ とする。これをもとに、 $\theta$ を次式で表す

$$\theta = \sum_{i=2}^4 w_i p_i, \quad \sum_{i=2}^4 w_i = 1, \quad w_i (i = 2, 3, 4) > 0$$

$\theta, p_i, w_i$ のとり値は表 3.1 に示す。 $w_i$ の値は実際には実務者へのインタビューをもとに決定するものである。全ての値を決定した時点で、前件部の各変数の全ての組合せに対して $\theta$ の値が決定されるので、予め $y$ と $\theta$ の対応関係を決めておけば、自動的に後件部は決定される。例えば、 $x_1$ が「良い」で、 $x_2$ が「大きい」、 $x_3$ が「普通」、 $x_4$ が「減少」のとき、表 3.1 により、

$$\theta = 0.80 \times -1.0 + 0.10 \times 0.0 + 0.10 \times 1.0 = -0.7$$

となり、後件部は「たぶんピークの前」となる。

以上の方法を用いれば、実務者がどの条件に重きをおいて判断するのかという方針を抽出することができる。したがって、実時間で洪水制御に関する判断を支援するだけでなく、様々な流入

表 3.1: ファジイ推論ルールの作成法

$x_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$
良い	0.80	0.10	0.10
普通	0.50	0.25	0.25
悪い	0.20	0.40	0.40

$x_2$	$p_2$
大きい	-1.0
普通	0.0
小さい	1.0

$x_3$	$p_3$
短い	-1.0
普通	0.0
長い	1.0

$x_4$	$p_4$
増加	-1.0
一定	0.0
減少	1.0

$y$	$\theta$
ピークの前	-1.00 $\leq \theta <$ -0.70
たぶんピークの前	-0.70 $\leq \theta <$ -0.25
どちらともいえない	-0.25 $\leq \theta \leq$ 0.25
たぶんピークの後	0.25 $< \theta \leq$ 0.70
ピークの後	0.70 $< \theta \leq$ 1.00

量系列について判断をシミュレートして結果を示し、実務者に自分の判断の傾向や誤りを自覚させることができ、実務者自身も判断基準を変更していくといった洪水制御訓練用シミュレータとして使用することもできる。また、本システムでは、ルール数をできる限り少なくして推論速度を向上させるため、上記手順で作成されたファジイ推論ルール群から冗長な組み合わせを統合することにより、自動的にルール数を圧縮する機能も組み込んでいる。

### 3.3.3 プロダクションシステムとファジイ推論システムの協調

本研究で作成した推論システムは、プロダクションシステムとファジイ推論システムが、共存し、互いに情報交換を行いながら推論を行う構造となっている。推論システム内のファジイ推論システムはすべて推論結果に確信度を付加して返す設計になっており<sup>3</sup>、その結果をプロダクションシステムが用いて推論を行うためには、相反する複数のデータに基づいて推論を行える機構が必要に

<sup>3</sup>例えば「ダム流入量がピークを過ぎた」という推論結果の確信度は0.7、「ダム流入量がピークに達していない」という推論結果が0.3というような値が返される。

なる。そこで、以下の方法で第2章で設計したプロダクションシステムに確信度を取り扱う枠組みを付加している。

1. プロダクションシステムが推論中に条件部変数 *var1* の値が解決不能になり、他の知識システムに推論を依頼したとする。
2. ファジィ推論システムが依頼を受けて推論を行い、

推論結果	確信度
<i>value1</i>	0.7
<i>value2</i>	0.3

という結論を依頼元に返したとする。

3. 依頼元のプロダクションシステムは、推論結果が1つでないことから、ファジィ推論の結果であることを認識し、推論結果のうちの1つ

*var1 is value1 with 0.7*

をワーキングメモリーに加えた状態で、自己の内部状態を複写して保存する。

4. 2つの推論結果の残りの1つ

*var1 is value2 with 0.3*

を先に加えたものと入れ換えて推論を開始する。ルールの実行後は、ルールの条件部の各条件文がAND（「かつ」）で結合しているため、条件部のそれぞれの確信度の積が実行部によってワーキングメモリーに付け加えられたデータの確信度となる。例えば、このときの推論結果が

推論結果	確信度
<i>result1</i>	0.1
<i>result2</i>	0.2

であったとする。

5. 結論が出ると、先に保存してあった状態に戻って、そこから再び推論を再開する。このときの推論結果が

推論結果	確信度
<i>result1</i>	0.4
<i>result3</i>	0.3

であったとする。

6. 全ての場合について推論を行い、その推論結果は加算され確信度付きで返される。

推論結果	確信度
<i>result1</i>	0.5
<i>result2</i>	0.2
<i>result3</i>	0.3

以上の方法でプロダクションシステムが確信度付きのデータを扱えるようになり、ファジィ推論システムとの通信・協調が可能となった。



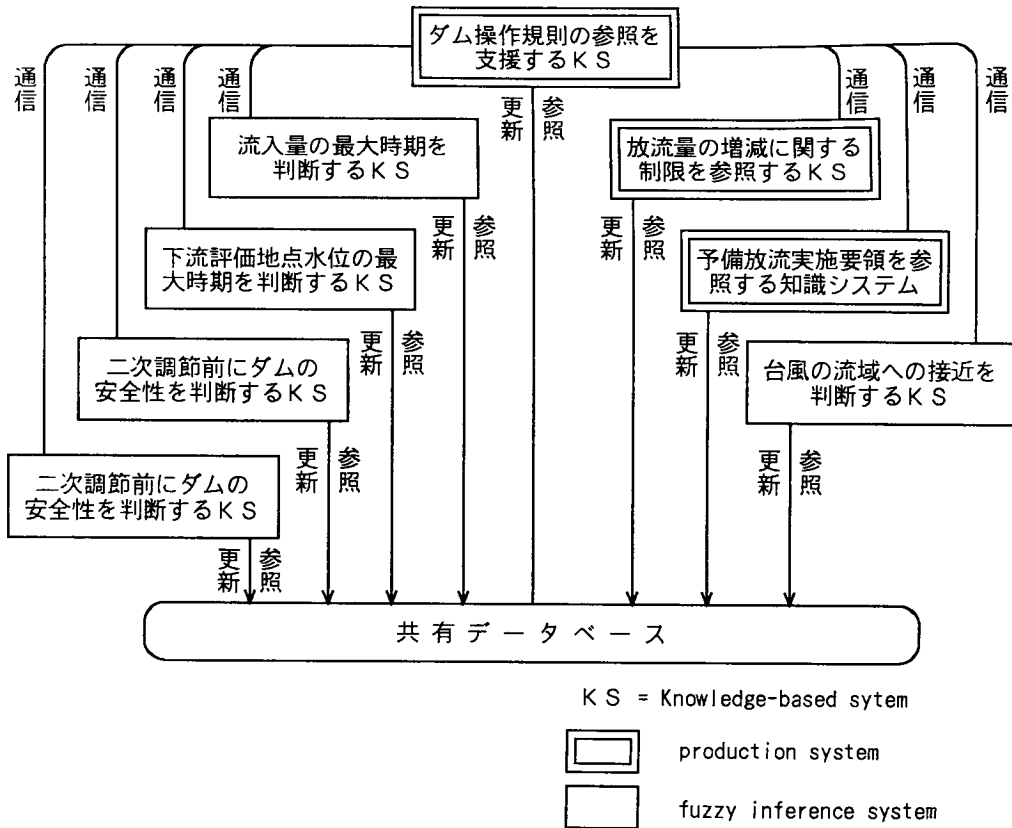


図 3.2: 推論システムの全体構成

### 3.3.4 推論システムの全体構成

以上で、洪水時の貯水池操作を支援する際に、貯水池操作規則が実務者に要求する判断を支援する知識の構成及び利用機構が完成した。これにより、予備放流や鍋底カットを含む複雑な操作方針の場合でも統一的な形式で判断を支援する知識群を扱うことができる。本研究では、複雑な操作方針を持つダムの例として淀川水系天ヶ瀬ダムの洪水時の操作を取り上げて洪水制御支援システムを具体化しているが、ファジイ推論を行う知識システムを導入した場合の推論システムの全体構成を図 3.2 に示す。ここでは、曖昧な知識にもとづく判断をすべてファジイ推論システムにまかせ、プロダクションシステムの知識ベースには確定的な知識のみを持たせることとしている。

推論システム内の知識システムは次の8つである。

1. ダム操作規則を知識ベースとして持つプロダクションシステム
2. ダム流入量が最大に達したかどうか判断するファジイ推論システム
3. 下流評価地点水位が最大に達したかどうか判断するファジイ推論システム
4. 二次調節前に、ダム容量に洪水調節を行う余裕があるかどうか判断するファジイ推論システム

5. 二次調節中に、ダム容量にさらに洪水調節を続ける余裕があるかどうか判断するファジィ推論システム
6. 単位時間当りの放流量の増減に関する制限事項を知識ベースに持つプロダクションシステム
7. 予備放流の実施要領を知識ベースとして持つプロダクションシステム
8. 予備放流を実施するにあたって台風がダム流域に接近するかどうかを判断するファジィ推論システム

以上8つの知識システムは、それぞれが推論エンジンと知識ベースが分離した構造を持つ1個のエキスパートシステムであり、これらが相互に協調することにより、最終的な放流量の決定が行われる。

### 3.4 対話型画面表示システムの設計

洪水制御において、流入量・河川の水位または流量・ダム貯水量といった意思決定の基礎となる定量的情報は、一定時間間隔で自動的に送られてくるものであり、実務者はこれらの情報をもとに限られた時間内で放流量の決定等洪水制御のための意思決定を行わなければならない。このとき実務者は緊迫した状況下に長時間おかれることになる。したがって、洪水制御における意思決定をより効果的に支援するためには現時点での情報や推論結果を提供するだけでなく、できるだけ長時間におけるデータの推移状況、予測の推移、意思決定の推移が容易に理解でき、現時点までの意思決定が正しかったかどうかの判断や次の意思決定が行いやすいような表示方法をとらなければならない。また、支援環境が提示した放流量と異なる決定を実務者が採用した場合には、その決定を受けて以降の支援を行わなければならない。そこで、本研究では、マルチウィンドウを採用することで推論システム内部の動きをリアルタイムで表示するとともに、ユーザーの要求に応じて放流量を変更したり、推論過程を詳細に表示したりすることの可能な対話型画面表示システムを開発した。

まず、通常ユーザーに示されている基本画面を図3.3に示す。本画面は、13のウィンドウに分割されている。最上部のウィンドウは、推論の状態や推論結果の表示など主に支援環境からの情報を表示するためのものである。次に8個のウィンドウが表示されているが、これらは推論システムを構成している8個の知識システム(図3.2参照)に相当し、推論の進行にともなって、現在稼働中の知識システムを反転表示する(図3.3では、操作規則の参照を支援する知識システムの部分が反転しており、まず操作規則中の該当項目の検索が始まったことを示している)したがって、本環境のユーザーはこれら8つのウィンドウを見ることで、推論システムが行っている推論の流れを視覚的に理解することができる。知識システム表示ウィンドウの下は、4つのウィンドウに分割されている。このうち、左上のウィンドウは現在時刻、ダム流入量、放流量、下流評価地点の水位、ダム貯水量など貯水池操作に直接関係する数値データを表示するウィンドウである。残りは、右上からそれぞれ貯水池流入量 放流量 流入量予測値をグラフィック表示するウィンドウ、下流評価地点の水位およびその予測値をグラフィック表示するウィンドウ、ダム貯水量およびその予測値をグラフィック表示するウィンドウである。これらのウィンドウは、数値データ表示ウィンドウに示される各データの時間変化を把握するためのものであり、現在時刻と推論の流れに応じて画面が左右にスクロールし、必要な時間帯のデータが自動的にウィンドウ内に示されるようになっている。

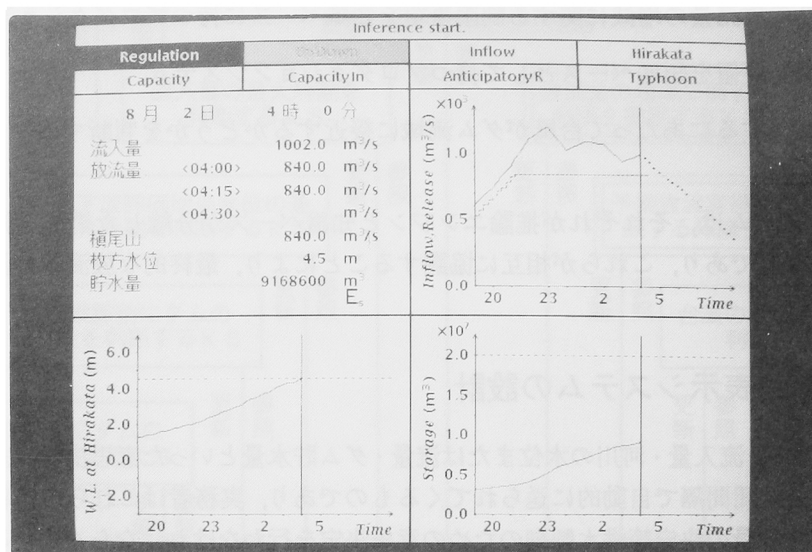


図 3.3: 画面表示例 (基本画面)

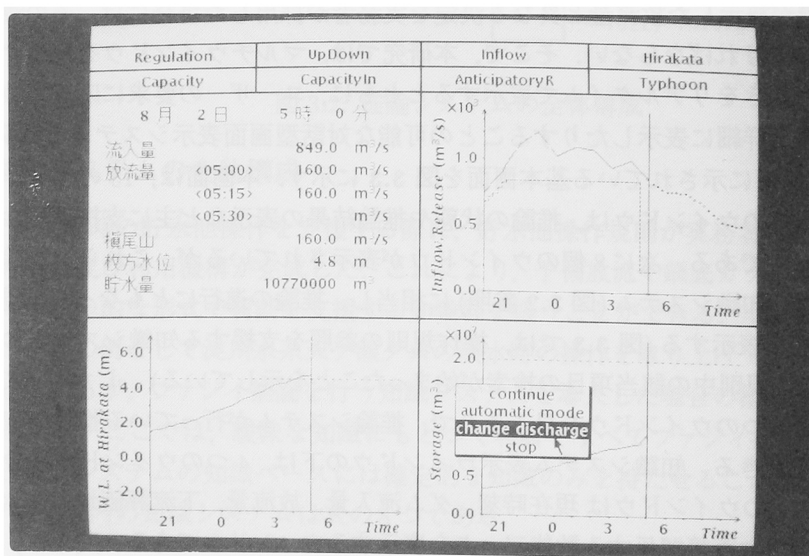


図 3.4: 画面表示例 (ユーザーの操作)

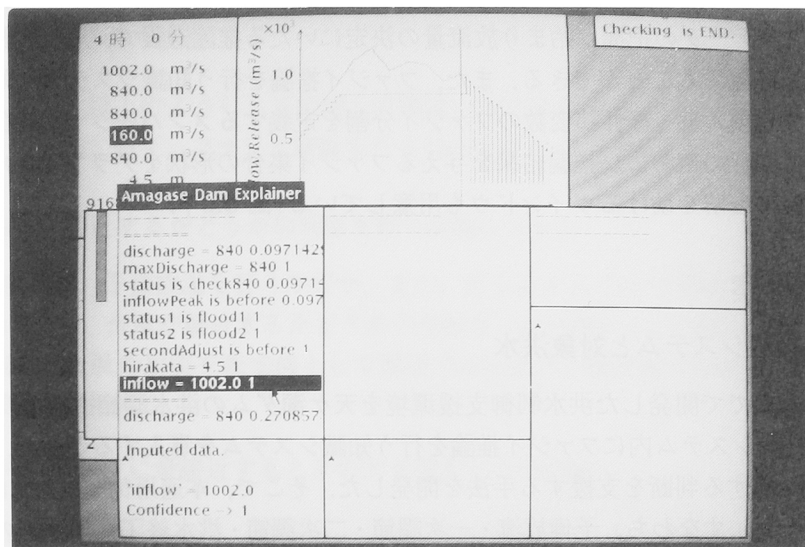


図 3.5: 画面表示例 (推論に用いたデータの表示)

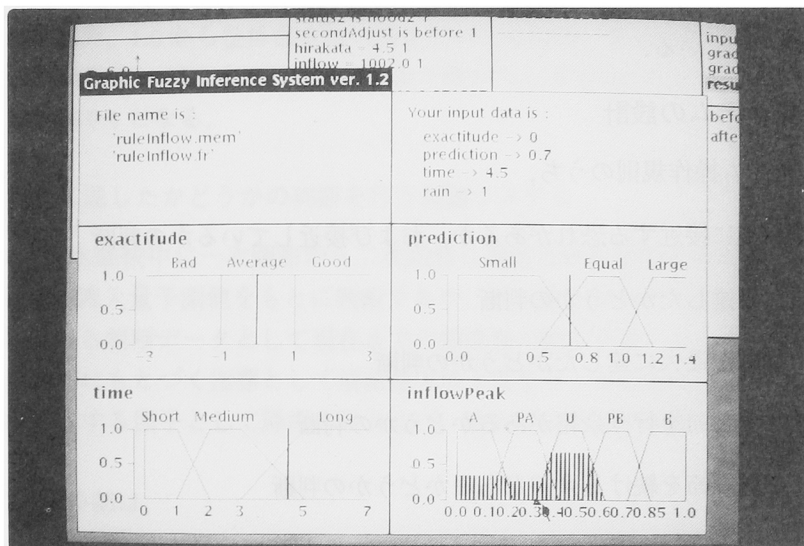


図 3.6: 画面表示例 (ファジイ推論の内容説明)

以上の画面が洪水制御の期間中常時表示されていることになるが、必要に応じてマウスの操作によってユーザー側から推論内容のより詳細な表示や決定の変更を要求することができる(図 3.4)。例えば、図 3.5 は、上記通常画面にオーバーラップして推論内容の表示を行うウインドウを開いたところである。観測データの把握に始まり放流量の決定にいたる推論過程で、用いられたデータや途中の推論結果を確認することができる。また、ファジイ推論を行う知識システムに対しては、推論ルールを構成する前件部 後件部変数のファジイ分割を定義するメンバーシップ関数と、推論に用いられた前件部変数の値および推論結果を与えるファジイ集合の形状をグラフィカルに表示することで、推論内容の理解を助けるウインドウも用意している(図 3.6)。

### 3.5 適用と考察

#### 3.5.1 適用貯水池システムと対象洪水

ここでは、3.4までで開発した洪水制御支援環境を天ヶ瀬ダムの洪水調節操作の支援に適用する。本章では、推論システム内にファジイ推論を行う知識システムを導入することで、貯水池操作規則が実務者に要求する判断を支援する手法を開発した。そこで、本適用例では、2.5.3 で示した一連の操作ステージ、すなわち、予備放流・一次調節・二次調節・洪水終了後の操作のすべてを支援の対象とする。適用対象となる洪水は1982年10号台風によるもので、降雨・流量データ並びにデータ収集シミュレータ、洪水予測シミュレータは2.5 で用いたものと同じものを使用する。ただし、洪水調節のすべての段階を対象とするので、2.5 で用いた流量・水位予測シミュレータに加えて、新たに、台風の進路及び降雨の予測シミュレータを手続き型知識システムに導入している。いずれも2.5.2 で述べた方法と同様に実績値の回りに乱数発生によりノイズを加える方法で、予測シミュレーションを行っている。

#### 3.5.2 各知識システムの設計

2.5.3 で示したダム操作規則のうち、

- 台風が近畿地方に接近する恐れがあるか、および接近しているかの判断
- 流入量が最大に達したかどうかの判断
- 枚方地点の流量が最大に達したかどうかの判断
- ダム容量に二次調節を行う余裕があるかどうかの判断
- ダム容量に二次調節を続ける余裕があるかどうかの判断

の5箇所は、実務者に判断を要求する部分である。これら判断項目は、いずれも洪水の将来の状況に対する何らかの予測を必要とするものであり、実務者は、台風のコースや雨量・流量など適当な予測モデルの出力とそれまでの観測データをもとにして判断を行っていると考えられる。そこで、上記5項目の判断を支援する知識システムを3.3に述べた方法で、ファジイ推論システムとすることにする。その他の部分は通常のプロダクションシステムによる推論を行う知識システムで取り扱うこととし、

- ダム操作規則の参照
- 単位時間当りの放流量の増減の制限の参照
- 予備放流実施要領の参照

に分割する。なお、以上のようにして作成した推論システムの全体構成は、既に、3.3.4の図 3.2 に示した通りである。以下、ファジィ推論を行う知識システムの知識構成について述べておく。

#### 台風が近畿地方に接近するかどうかの判断を行う知識システム

この判断項目は、予備放流を行うか否か、また、行うとすればいつ開始するかに関係するものである(2.5.3 参照)。台風が接近するかどうかの判断は、天ヶ瀬ダムと台風の最も接近したときの距離の予測値と、台風の規模を表す値として風速 15m/s 以上の強風域半径を用いて行うことにした。したがって、前件部は、

1. 台風が天ヶ瀬ダムに最接近するときの天ヶ瀬ダムとの距離
2. 台風の強風域半径

の2変数からなり、後件部変数は、

- 「台風が近畿地方に接近するまたはその恐れがある」という事象の確からしさ

である。なお、3.3.2で述べた通り、後件部変数とする判断事象の確からしさはすべて0.0~1.0の間の値をとるものであり、1.0から後件部変数の値を引いたものが、反対の事象の確からしさとなる。例えば、「台風が近畿地方に接近する」という事象の確からしさが0.6のとき、「接近しない」という事象の確からしさは0.4となる。

#### ダム流入量が最大に達したかどうかの判断を行う知識システム

この判断は、洪水継続中に一次調節から二次調節に調節方針を変更する際に必要になる項目である。基本的には、流入量予測値をもとに判断するが、流入量予測モデルの精度に関する評価が低い場合、それに代わる判断データとして現在までの観測値の動向を用いることになる。そこで、現在までの流入量系列にもとづく指標として観測最大流入量を与えた時刻からの経過時間を、また流入量系列に直接影響する因子として降雨を取り上げ、過去3時間の総雨量の変動を前件部変数に加えている。

したがって、前件部は、

1. 流入量予測モデルの精度に関する評価、
2. 予測流入量を用いた指標
3. 観測最大流入量からの経過時間
4. 過去3時間の総雨量の変動

の4変数からなり、後件部変数は、

- 「流入量が最大に達する前である」という事象の確からしさ

となる。

前件部変数の1は、3.3.2に述べたように、これが「良い」(良く当たる)ときには推論は予測流入量に重きをおいて行われ、「悪い」(余り当たらない)に近づくにしたがって実績値に重きをおいた判断に移行するためのパラメータである。また、2については、 $q_p$ を観測最大流入量、 $q_{max}$ を予測流入量系列の中の最大値としたとき、 $(q_{max}/q_p) \geq 1$ ならば $q_{max}/q_p$ を、 $(q_{max}/q_p) < 1$ のとき、

$$\frac{1}{\sum_i w(i)\Delta t} \sum_i \frac{q(i)}{q_p} w(i) \Delta t \quad (3.1)$$

をこの指標として用いている。ここに、 $q(i)$ は予測値、 $w(i)$ は各予測値の重みである。予測値の精度については前件部変数の1で既に取り入れているので、この指標の算定時は精度を考慮せずに予測値を取り扱うことにする。なお、 $w(i)$ は現在値に対するものを1.0として指数関数的に増加していくものを用いている。前件部変数4には、過去3時間分の実績総雨量から、前回の推論時(15分前)における3時間分の総雨量を引いた差を用いることにする。

枚方地点の水位が最大に達したかどうかの判断を行う知識システム

この判断は、二次調節終了を決定する際に必要な判断である。基本的には、水位の予測値をもとに判断することになるが、水位予測モデルの精度に関する評価が低い場合、それに代わる判断規準として観測データを用いることになる。そこで、現在までの水位の系列にもとづく指標として観測最大水位を与えた時刻からの経過時間を用いることとし、さらに水位に影響を与える因子として、枚方地点の上流に位置し、テレメータ値も入手できる高浜地点の流量変動を使用することとした。

したがって、前件部は

1. 予測モデルの精度に関する評価
2. 予測枚方水位を用いた指標
3. 観測最大水位からの経過時間
4. 過去5時間の高浜地点の流量の変動

の4変数からなり、後件部変数は、

- 「枚方水位が最大に達する前である」という事象の確からしさ

となる。なお、前件部変数2については、流入量最大の判断と同じ考え方で指標の値を決めている。また、4については、過去5時間分の高浜地点の流量に、最小2乗法を用いて直線をあてはめ、その傾きを用いることにする。

ダム容量に二次調節を行う余裕があるかどうかの判断を行う知識システム

これは、貯水池の操作ステージを一次調節から二次調節に移行する時期の判断に必要な知識システムである。貯水量を予測して判断するのが適当と考えられ、現在の貯水池の空き容量から二次調節量を差し引いたものを用いて判断することとした。しかし、二次調節を終了する時刻は枚方地点の水位によって決まること、二次調節中の貯水量増加量は流入量によって左右されることを考慮すれば、二次調節に必要な貯水池容量を正確に予測するのは困難である。そこで、実測値にもとづくものとして、推論時の貯水量と流入量を取り入れたルール構成を取ることにした。

判断ルールの前件部は、

1. 予測モデルの精度に関する評価
2. ダムの空き容量と二次調節による増加貯水量の差
3. ダムの空き容量
4. ダム流入量

の4変数からなり、後件部変数は、

- 「二次調節を行う余裕がある」という事象の確からしさ

とする。なお、前件部変数の1については、二次調節が枚方の水位のピークまで行われることと、流入量と放流量の差が貯水量の変動となって表れるということから、予測モデルの精度を評価する際には、流入量予測モデルと枚方水位予測モデルの双方を総合的に評価する必要があることに注意する必要がある。

ダム容量に二次調節を続ける余裕があるかどうかの判断を行う知識システム

二次調節の終了時期を判断するのに必要となる知識システムの一つである。既に二次調節に入っている状況で用いられる知識ベースであるので、二次調節の終了は短時間で実行できることもあり、現在の貯水池の状態のみで判断してもよいと考えられる。現在の貯水池の状態を示す様々なデータのうちでは、貯水量が最も大きなウェイトで推論結果を左右すると考えられる。そこで、貯水池の空き容量を基本にし、追加的情報としてダム流入量を前件部変数として導入した。

したがって、判断ルールの前件部は、

1. ダムの空き容量
2. ダム流入量

の2変数からなり、後件部変数は、

- 「二次調節を続ける余裕がある」という事象の確からしさ

となる。



### 3.5.3 適用結果の一例

3.5.2で構築した知識ベースを用いたとき、洪水制御支援環境が推薦した放流量をそのまま採用した場合の1982年8月1日0時から8月3日3時までの制御結果を図3.7～図3.10に示す(4例とも全く同じ条件での支援シミュレーション結果である。ただし、流量などの予測シミュレーションに乱数を使用しているため結果は微妙に異なっている) 第2章での適用結果では、予測シミュレーションの出力値に応じて大きく制御結果が異なっていたが、今回、予測を伴う判断を支援する知識をファジイ推論ルールを用いて予測モデルの精度に応じた表現にすることで予測値のばらつきに対してロバストな判断を行えるようになっていくことがわかる。

また、ここで示した適用結果は、本研究で設計した洪水制御支援環境が、現在、洪水制御のために操作されるダムとして提供されている中で、最も複雑な操作方式をもつものの1つである天ヶ瀬ダムの制御、それも1982年10号台風という、かなり緊迫した状況をもたらした洪水の制御において、最適とは言えなくても、見劣りのしない操作を行い得ることを示している。今後、他のダムや他の洪水についても支援シミュレーションを行っていく必要があるが、単ダム操作の支援に関しては、本研究で開発した手法が有効であることが確認できたといえよう。

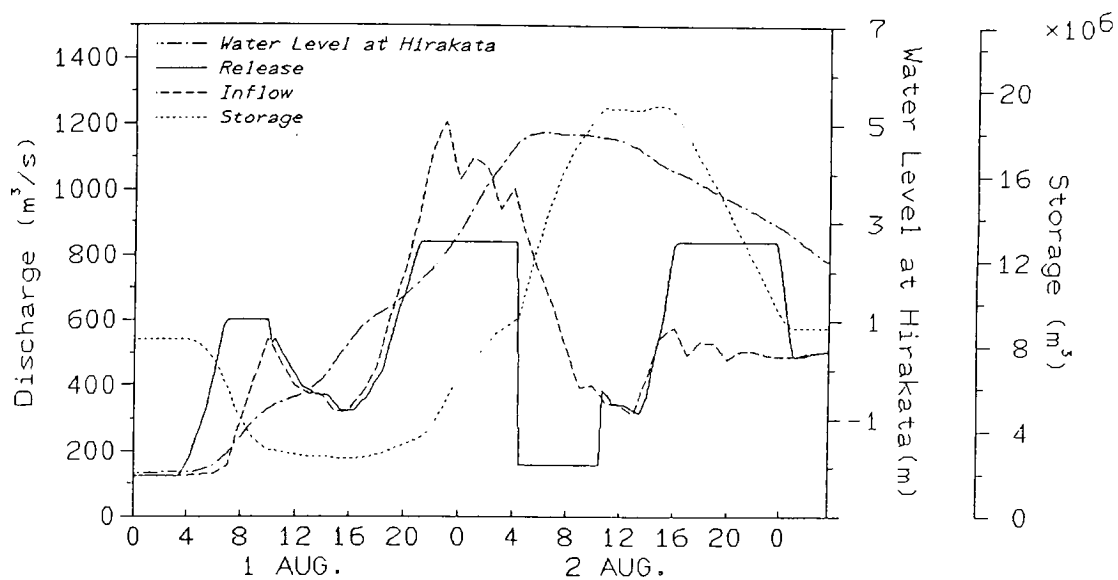


図 3.7: 制御結果1

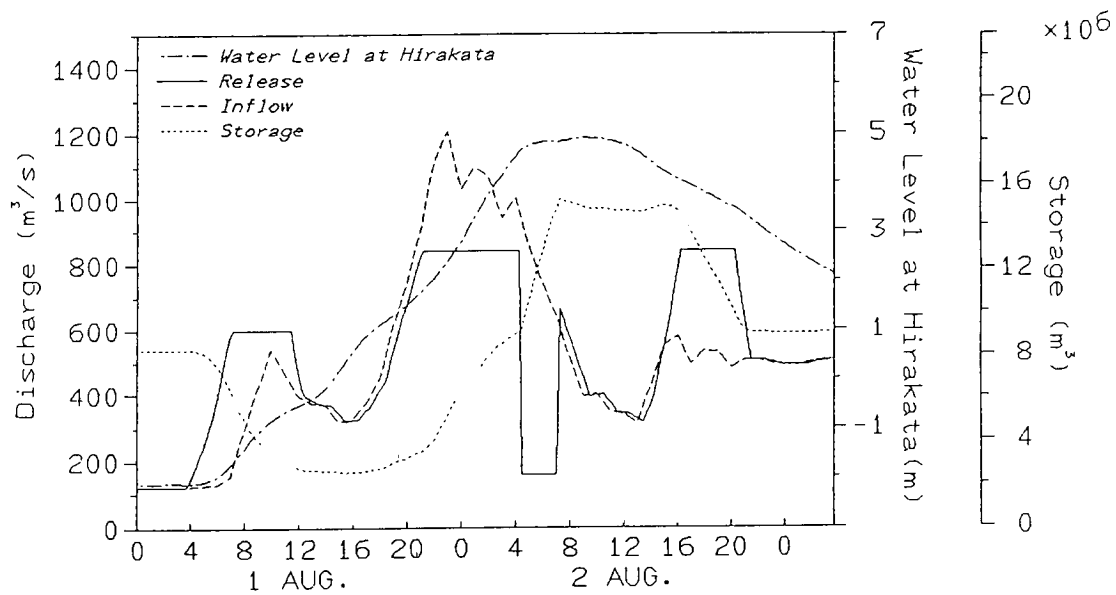


図 3.8: 制御結果2

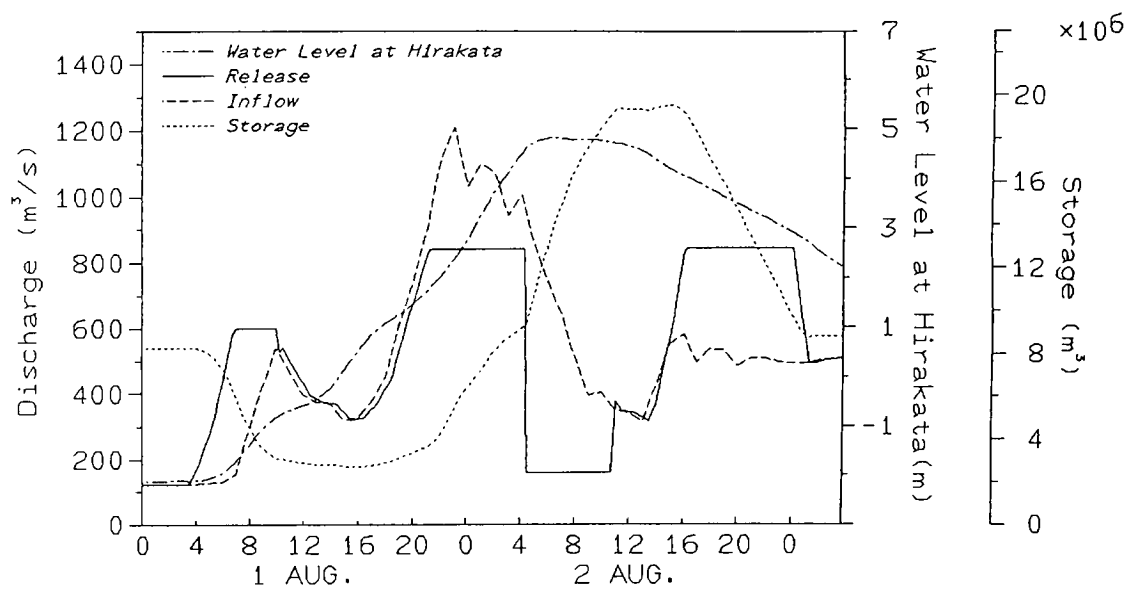


図 3.9: 制御結果3

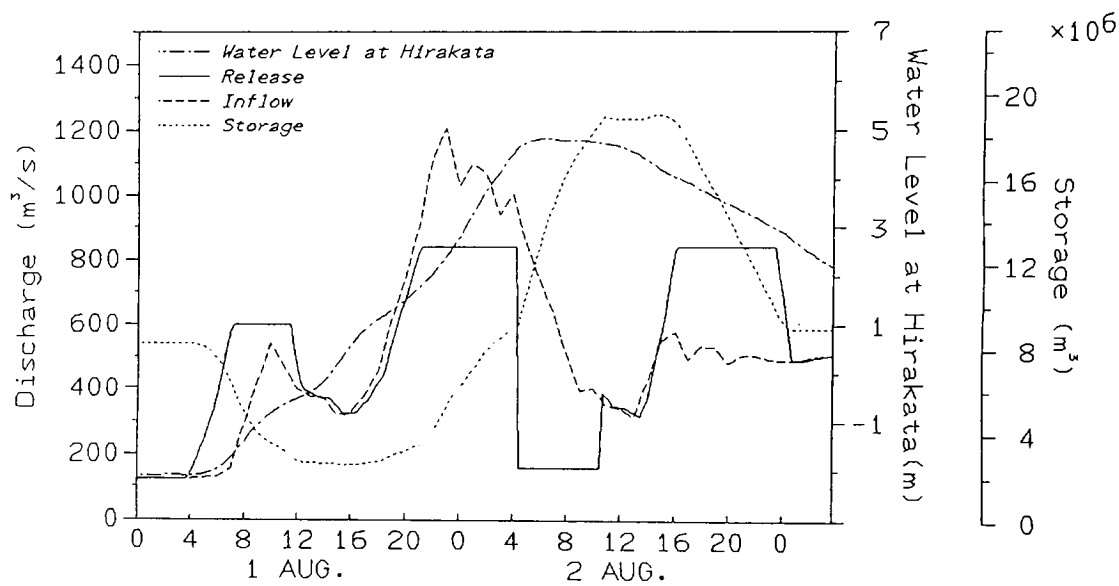


図 3.10: 制御結果4

### 3.6 結語

本章では、洪水時の貯水池操作に必要な判断項目が、主に、洪水事象の予測を伴うものであることに注意し、これら判断を、実際の管理に利用できる降雨や流量の予測モデルの精度に応じた形で支援できる知識の構成方法について考察した。本章で得られた成果を以下に要約しておく。

1. 洪水時の貯水池操作にあたって実務者が行わなければならない判断を支援する知識の特徴について考え、その表現手段として、ファジイ推論ルールを採用した。これにともない推論システムに、新たにファジイ推論を行う知識システムを追加し、ファジイ推論システムとプロダクションシステム間の協調機構を実現した。
2. 雨量や流量などの予測モデルの出力値を用いた判断論理をモデル化し、予測モデルの評価と予測値さらに実測値を用いた統一的な知識表現法を提案した。あわせて、予測モデルの精度に対する評価と判断根拠とするデータに対する重みを入力すれば自動的にファジイ推論ルールが作成できるシステムを開発した。
3. 洪水制御支援環境と実務者を結ぶ対話型画面表示システムを開発した。実務者に推論結果並びにデータを表示する部分は、理解し易いグラフィクス表示とするとともに、推論過程を実務者に対して明示できる機構と、実務者個人の意見を制御結果に反映できる機構を提供した。
4. 天ヶ瀬ダムの操作の全過程を知識ベース化し、1982年10号台風による洪水を入力としたときの制御シミュレーションを行った。この結果、本環境は、現在行われている貯水池操作を十分支援できる能力を有することが確認できた。

今後は、さらに他の洪水での洪水調節シミュレーションを行っていくとともにシステムを成長させるための知識獲得の方法について考えていく必要がある。

## 参考文献

- [1] 望月邦夫：淀川の治水計画とそのシステム工学的研究，京都大学学位論文，1970.
- [2] 高棹琢馬・椎葉充晴：状態空間法による流出予測－kinematic wave 法を中心として－，京都大学防災研究所年報，第 23 号 B-2，pp. 211-226, 1980.
- [3] 高棹琢馬・椎葉充晴・劉春燕・上林好之：交流出の実時間予測情報の形式について，土木学会水工学論文集，第 34 巻，pp. 79-84.
- [4] Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [5] 寺野寿朗 浅居喜代治・菅野道夫：ファジィシステム入門，オーム社，1987.
- [6] 寺野寿朗 浅居喜代治・菅野道夫：応用ファジィシステム入門，オーム社，1989.
- [7] 山川烈（監修）：ファジィ応用ハンドブック，工業調査会，1991.
- [8] 例えば，水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988.
- [9] 小尻利治・池淵周一・十合貴弘：ファジィ制御によるダム貯水池の実時間操作に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 30 号 B-2，pp.323-339，1987.
- [10] 池淵周一・宮川裕史 河端伸一郎：貯水池操作システムへのファジィ制御理論の適用に関する研究 (II)，京都大学防災研究所年報第 32 号 B-2，pp.371-382，1987.
- [11] 小尻利治・藤井忠直：知識ベースを用いたファジィ貯水池操作に関する研究，土木学会水工学論文集，第 34 巻，pp.601-606，1990.
- [12] Yagi, S.: An application of fuzzy set theory to the computer aided control of pumps in combined sewer systems, Proc. of the fifth international Conference on Urban Storm Drainage, Vol. 3, pp. 1269-1274, 1990.
- [13] 岩下修・西川和也・福西祐 日向博文：ダム集中制御の為にエキスパートシステムの開発，土木学会水工学論文集，第 34 巻，pp.583-588，1990.
- [14] 藤田睦博：あいまい推論の流出予測問題への適用，第 31 回水理講演会論文集，pp. 125-130，1987.

- 
- [15] 日向博文・日野幹雄・福西祐：Fuzzy 推論システムを用いた流出予測，第 33 回水理講演会論文集，pp. 67-72，1989.
- [16] 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，pp.96-113，1988.

## 第 4 章

# 洪水制御支援のための知識の構成と獲得法

### 4.1 概説

今日、ダムによる洪水調節を支援するシステムの必要性が強く認識されており、AI 技術を利用してダムの操作を支援するシステムとして様々な形態のものが報告されている [1, 2]。同時に、洪水制御支援のための知識ベースシステムの構築が種々試みられてくるにつれ、支援のための知識の獲得をいかに行うかという問題が顕在化してきている。もちろんこの問題は、他の分野におけるエキスパートシステム構築過程でも同様に指摘されており、いわゆるファイゲンバウムボトルネックとして知られている。これは、専門家の持つ知識の抽出にも限界があることを意味しており、現在、知識工学の分野でもこれを回避するために「深い知識の利用」や「例題からの学習」など種々の方法が検討されている [3]。しかし、これらの手法はいずれも人間が知識に基づいて思考する過程の一つの側面を強調してモデル化したものであり、一つの手法を適用するだけでダム操作支援のための知識獲得問題が劇的に解決するとは考えにくい。さらに、洪水制御の分野において、ダム操作支援のための知識を獲得することの困難さは、ファイゲンバウムボトルネックに基づくものだけでなく、もっと基本的な問題、すなわち、「ダム操作においてエキスパートは果たして存在するのか」という問題にも起因している。また、将来、雨量や流入量等の予測モデルの性能も向上し、新たに実用的なモデルが登場する可能性を考慮すると、現行のダム操作方法を踏襲することが最良の洪水制御支援に必ずしもつながらないといった点も考えなければならない。

そこで、本章では、現在までに提案されてきた洪水制御支援知識ベースシステムを知識の構成及び獲得といった観点から概観し、現在、知識ベースシステムに基づくダム操作の支援という手法が直面している問題の本質を明らかにする。その上で、今後、ダム操作支援知識ベースシステムが洪水時ダム操作の信頼性を高めるものとして実用化されていくために満たすべき条件を明示する。そして、ここで提示された条件を満足する知識の構成方法として、既に、第 2, 3 章において開発した協調問題解決型推論システムを拡張し、判断に利用できる情報のレベルに応じた多段階知識ベース構成法を提案する。

## 4.2 洪水制御支援のための知識の構成と獲得方法

### 4.2.1 知識構成からみたダム操作支援知識ベースシステムの現状と課題

洪水時ダム操作に関する知識ベースシステムの設計においては、操作に必要なあるいは利用可能な知識をいかに抽出し、システム化するかがキーポイントであることはいうまでもない。したがって、今後、これら知識ベースシステムが十分実用に耐えるシステムとして現場に受け入れられて行くためには、洪水制御のための知識の獲得及びその計算機上での構成方法について、詳細に検討して行かなければならない。そこで、以下、これまでに提案されてきたダム操作支援知識ベースシステムについて、知識の獲得及び表現方法と知識ベースの構成方法を中心に概観し、その現状と問題点を考えることにする。

神田ら[4]は、ダムに対して定められている操作規則と超過洪水に対する操作指針をプロダクションルールで記述している。岩下ら[5]は、発電用ダムの集中制御を対象として、制御のための知識をダム操作規則に対応する「操作方法を求めるための知識ベース」、「流入量増減予測のための知識ベース」、「放流量の増減量を求めるための知識ベース」の3種類に分け、各知識ベースを操作員に対する聞き取り調査を通じて構築している。また、梅田ら[6]、山口ら[7]は、洪水警報および洪水警戒体制の発令を対象として、実務者へのインタビュー等を通じて得た知識をプロダクションルールを用いて表現している。また、高見ら[8]は操作規則を遵守することを念頭におき、洪水制御の各断面で起こり得ると考えられる状況を想定したシナリオを描き、これをプロダクションルールで記述することを試みている。

一方、小尻ら[9, 10]は、過去の洪水による流入量ハイドログラフを極大洪水・大洪水・計画洪水・通常洪水の4種類に分類するとともに、ハイドログラフ 貯水量・流入量の代表値の組み合わせに対してDPを用いた最適放流量系列を計算し、その結果をファジイ推論ルールに書き直すという手順で、貯水池操作のための知識ベースを作成する方法を提案している。榊間ら[11]は、最適放流量をIF-THEN形式の知識ベースとして表現するかわりに、ニューラルネットワークを用いて表現する方法についても検討している。また、大石ら[12]は、ダム流入量予測問題に貯留関数法をもとにした定性的推論を用い、流入量の挙動に対して定性的な予測情報を表示する方法を提案している。

また、本研究では、第2章で、ダム操作規則を知識ベースに格納する際に、規則の条件部にその条件が現在生起しているかどうか実務者が判断しなければならない事項が含まれており、この判断が操作支援のキーポイントになることを指摘した。ついで、操作規則と操作規則適用に当たって必要な判断が組合わさって最終的な操作を決定する構造を協調型推論によって表現することで、知識群のモジュール化を可能にし、知識の構築及び保守の利便性を実現する方法を提案した。さらに、第3章において、実務者の判断が流入量予測値等数学的モデル化の適したシステムからの予測値と観測値の両方を参考にして行われることに着目し、知識の条件部を構成する項目とそれに対する重みをインタビューによって決定すれば、自動的に判断ルールが構成できるシステムを設計した。

さて、上記のいずれの方法が優れているかは、適用するダムの条件や支援対象とする項目によって異なるが、各々の方法は次のような利点・欠点を有している。まず、操作の方針については、操作規則にベースをおくタイプと最適放流量計算に基礎をおくタイプとの2種類がある。操作規則をベースとするタイプは、もちろん現行のダム操作方式を支援することを意図しており、ダム操作の現場からのニーズに合致した方向であるといえる。一方、最適放流計算に基礎をおく方法は、放流



操作の最適性を追求する戦略を知識ベースとして表現することにより、知識獲得の問題に対して一定の解決策を提示するものであるが、ここで提示される操作方針と操作規則が示す方針との対応について注意する必要がある。

また、知識獲得の方法については、実務者へのインタビューを基本とする方法と、最適放流量計算や水文現象の数値モデルの定性的表現などいわゆる「深い知識」をもとにした方法との2種類に大別できる。前者は、知識そのものをダイレクトに実務者へのインタビューから作成していく方法と、実務者の判断過程のモデルを作成し、そのパラメータをインタビューによって決定する方法とに大別できる。インタビュー等によって実務者から知識を獲得する方法は、現在、知識ベースシステム作成において最も広く用いられている。しかし、知識工学的手法は解決すべき問題を解くための十分な知識を持つ専門家が存在することが条件となっており、この条件が洪水時の貯水池操作問題の場合に成立するかどうかは疑問と言わざるを得ない。この問題は、実務者の知識レベルとダム操作の将来的な信頼性向上の可能性という2つの側面から構成されている。

第1の側面は、前節で触れたように、現在ダム操作に携わっている実務者が十分な操作経験をつむ機会がないことに起因する。このことは、単に操作員が頻繁に変わるといった単なるダム管理体制上の問題ではなく、もともとダムによる調節計画が再現期間50年、100年といった規模の洪水を対象としているため、計画洪水と同程度の規模の洪水は頻繁に経験できるものではないということの意味する。したがって、実務者の知識は、たとえ抽出に成功したとしても多くの場合計画洪水に達しない洪水を対象とする知識であり、実務者の知識のみから構成されたシステムは、本当の意味で支援情報が求められるときにそのドメインの知識を持っていないという事態に陥る可能性がある。

第2の側面は、洪水事象の観測技術の進歩とそれに基づく降雨・流量の予測技術の進歩に関係している。近年、気象衛星やレーダ雨量計が整備され、これらによる観測データは、すでにダム管理の現場においても入手可能になっている。一方、ダム操作の意思決定に最も重要な役割を果たす情報の一つである洪水予測手法については、決定論的に1つの予測値系列を得るといったレベルのものから、実時間確率予測手法まで様々なレベルのものが提案されている。しかし、現在のところ河川管理現場では決定論的手法に頼っているところも多く、その信頼性が低いため洪水制御の意思決定に直接利用されていないのが現状である[13]。もちろん、将来的には、洪水の確率予測システムがすべての現場で使用可能になり意思決定の基礎となることが望ましいことはいうまでもない。したがって、ダム操作に用いる予測情報は、今後、徐々にシステムの入れ替えが行われていくものと考えられる。

以上概観したように、ダム操作において重要な役割を果たす観測技術・予測技術の進歩と現実には使用されている技術に格差がある状況を考えれば、現時点でダム管理に関わる実務者の知識を抽出してシステムに格納することだけにとらわれていると、ダム管理のために開発されてきた種々の技術を十分利用できるシステムを設計することは不可能ということになる。また、新技術が導入された場合でも、第1の側面でも述べた理由から、それを有効に利用するノウハウが醸成されるまでには50年、100年といった期間を要することになる。このことは、ダム操作支援知識ベースシステムの持つ利点として強調される知識の保守・更新の容易さが、実用上は役に立たないといった皮肉な事態が生じることを意味する。洪水制御支援知識ベースシステムに対するニーズが、観測技術や予測技術の進歩にともなう処理情報の増大といった背景から出ていることを考えると、このような事態を回避する方法論を構築しない限り、その存在意義が問われることになる。

実務者の現時点での知識の抽出に関する以上のような問題点を克服する一つの方法として、いわゆる「深い知識」[14]の利用が考えられる。深い知識とは、問題解決に直接用いられる「浅い知識」の正当性の根拠となる知識を言い、現象の物理モデルなどがその例としてあげられている。洪水時の意思決定に関して深い知識として現在利用できる可能性のあるモデルとしては、DPによる最適計算が考えられる。小尻ら[9, 10]の方法はこのことに着目したものである。しかし、DP理論に基づく実時間最適操作手法は、入力情報の不確かさや観測情報・予測情報の有効利用といった点について理論的裏付けと能力があるにも関わらず、現在まで実際の操作手法としては受け入れられないまま今日に至っている。これは、最適放流量計算に用いられる操作方針とダム計画時に定められた操作規則との対応が明確でないため、計算の結果出力される各時刻の放流量について分かりやすいロジックでその正当性を説明できる機能がないことに原因があると考えられる。したがって、深い知識として代表ハイドログラフについてもとめた最適放流量系列を使用する場合、そこから生成される知識が現行のダム操作を支援するというよりも操作方針そのものを指示するという形になり、支援情報を要求する側と提供するシステムとの間に新たな摩擦が生じる可能性がある。

以上、洪水制御支援のための知識ベースシステムを構築する際の知識の構成および獲得方法について、その現状を分析し問題点を抽出した。これらの分析をもとに考えると、現在、洪水制御支援のための知識ベースシステムの直面している課題は、ダム操作規則に定められた操作方針を守りつつ、洪水事象の観測・予測技術の進歩にともない新たに利用可能となった情報を有効に利用するための知識を、実務者が十分な経験を積むのを待つことなく作成し、かつ、実務者に理解し易いロジックで表現する枠組みを構築することに集約されると言える。また、その際、利用可能な情報のレベルに応じた知識を構成し、各レベルの知識の能力と限界を明示できる枠組みとなっていることも必要である。

#### 4.2.2 洪水制御支援のための知識ベースの構成方法

前節では、現在までに提案されてきた洪水時ダム操作支援のための種々の知識ベースシステムを概観し、知識の構成及び獲得方法からみた課題を抽出した。すなわち、今後、ダム操作支援知識ベースシステムが実用的なシステムとなり本当の意味で洪水制御の信頼性を高めて行く能力を持つためには、

1. 現時点での実務者の知識を格納しているだけではなく、降雨予測や流量予測の新しい技術やシステムを利用するための知識を提供できること、
2. 知識を構成する論理が理解し易いものであること、
3. 各ダムに定められている操作規則の遵守を保証する知識構成であること、

といった条件を備えている必要がある。特に、1の条件を満足するためには、判断材料となる情報が追加された場合でも、それ以前のレベルの知識の大部分は書き換える必要がないようなモジュール化された知識利用機構が必要となる。

本研究では、第2, 3章で知識のモジュール化を考慮したシステムとして、協調問題解決型洪水制御支援環境を提案した。これは、洪水時のダム操作に必要な知識を操作規則そのものと操作規則適用にあたって実務者が判断しなければならない問題群とに分割した上で、各問題を解決する為の

知識ベース・推論エンジン データベースを備えた知識システムを推論の最小単位とし、これら知識システム群の協調によって全体的な解を得るという方法である。また、このシステムを淀川流域の天ヶ瀬ダムの管理に適用し、最終的に8個の知識システムから構成される推論システムを提案している(図3.2参照)。この推論システムでは、協調する知識システムの採用によって、知識の追加・変更には、新たな知識システムの追加や該当知識システム内の知識ベースの変更のみで対処できることが最大の利点であった。しかし、上述1の条件は、3.2に示す1つの知識システム(例えば、流入量ピークが過ぎたかどうかの判断を担当する知識システム)内での判断材料、言い替えれば、ルールの条件部の項目が増えた場合に知識の再構成が容易であることを要求しているため、判断項目に基づいて推論単位を決定するだけでは不十分である。そこで、本章では、操作規則適用に必要な判断項目に基づいて定義した知識システムを、その判断のための材料となるデータの種類に応じてさらに複数の知識システムに分割する事を考え、図4.1に示すような多段階知識ベース構成法を提案する。

図中、レベル0に対応する知識システムは、判断項目を単位とした場合の知識システムであり、この段階では、判断に用いる知識の条件部は、観測データに関する項目と降雨や流量の予測システムから与えられる情報が混在している。そこで、まず、最も単純な判断方法として観測データのみから判断する知識システムの集合を考える(レベル1)。もちろん、単純な判断レベルであるとはいっても、現在では、雨量や流量について多数の情報が得られるため、その種類に応じて複数の知識システムを考えることにする。例えば、ダム流入量のピーク時期の判断という項目に対しては、観測流入量の傾向をもとに判断する知識システムや観測雨量の傾向をもとに判断を行う知識システムなどが考えられる。ここで注意すべきことは、これらの知識システムが異なるデータをもとに同一の判断項目について各々異なる出力を出すことになるということである。そこで、これら複数の知識システムの出力する確信度をもとに、最終的な結論を出す上位の知識システムを用意する。この知識システムは、その下位に位置する知識システムの持つ知識の特性や重要性を判断するいわゆるメタ知識を持つことになる。なお、レベル0の構成方法においても、第3.3.2節で知識作成のためのパラメータとして用いた条件項目の結論に対する重みも、ここでいうメタ知識の1種ということが出来る。しかし、ダム流入量ピーク時期の判断など、操作規則適用に当たってキーポイントとなる項目について、判断の基礎となるデータの種類に応じた複数の知識システム群を考え、その上位にメタ知識システムを考えることにより、例えば、洪水の状況に応じて重視するデータを変更するなどより柔軟な対応が可能となる。

さて、最も単純なレベル1の知識構成が終わると、次に、降雨・流量の予測システムによる出力値を取り入れた判断レベル(レベル2)の知識構成に移らなければならない。この作業は、利用可能となった予測システムの出力値を用いた推論を行う知識システムを設計し、これを、レベル1の段階で導入したデータの直接的な利用を担当する下位知識システム群と並列に配置するとともに、メタ知識システムを更新するという内容からなる。操作規則が要求する判断項目を支援する推論単位を、1つの知識システムから、判断材料として利用すべきデータを直接扱う複数の下位知識システム群とそれらを統括するメタ知識システムに分割したことにより、判断材料となるデータが増加しても、従来レベルの判断を行う知識システム群に手を加える必要がなく、新たなデータを単独で利用する知識システムの追加とメタ知識システムの調整だけで済むことになった。このことは、上位レベルの知識システム群が下位レベルの知識システム群をそのまま含んだ形で発展していくこと

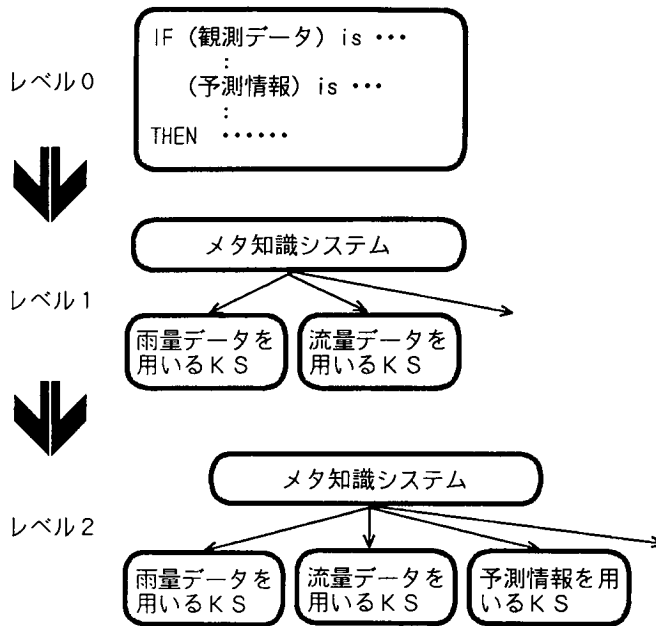


図 4.1: 洪水制御支援のための多段階知識ベース構成法

を可能にしており、上に述べた条件1だけでなく、条件2も満足できることを示している。すなわち、未だ多くのダム貯水池では確率的洪水予測手法が利用できる状態ではないため、観測データに重きをおいた判断をせざるを得ない状況である。つまり、現時点では実務者の知識の多くはレベル1の構造であると考えられる。したがって、レベル1の知識構成を包含した形で次のレベルの知識が構成できるということは、新たな情報の利用方法を現時点での実務者の判断ロジックの拡張として提示できることを意味し、知識を構成する論理も、全く新しい推論ルールの集合を提示することに比べて理解し易いという特徴がある。

#### 4.2.3 洪水制御支援のための知識の構造と獲得について

洪水制御を行うに当たって必要となる知識は、

1. マニュアルに関する知識
2. 現象に関する知識
3. 利用できる情報に関する知識
4. 行為の結果に関する知識

の4種類に大別して考えることができる。1は操作規則の内容や関連システムの操作方法などの理解に当たる。2は、さらに、現象の機構に関する知識、統計的知識とその例外に関する知識に分けられよう。この内、物理機構に関する知識は、流出モデルや予測手法等通常数学的モデルで記述され、主として観測データから加工情報を作成することに用いられる。この知識は、既に計算機によ

るデータ処理が不可欠なレベルに達しているので、経験等によって成長するとは考えにくい。したがって、現象に関する経験的知識とは、現象の統計的理解とその例外に関する知識からなると考えられる。ここでいう統計的知識とは、過去の出水事例との比較やいわゆる流域の傾向といった類のものである。また、この知識に関する例外を知っているということも経験的知識として重要である。4.2.2で述べたレベル1の知識システムがこれらに相当する。3は、洪水という現象の各断面で必要な判断を行うために、入手可能な情報の内どれが必要なのか、また、どう利用すればよいのかに関する知識で、4.2.2で述べたメタ知識システムが持つべき知識に当たる。4は、現在の決定が将来に及ぼす影響や決定にともなう他の行動に関する知識である。以上見てきたように、実務者が洪水を経験することで得られる知識、すなわち、知識ベースアプローチが有効な部分は、1, 2の内の統計的理解と例外に関する知識、3が中心となる。特に、3の利用できる情報に関する知識は、最終的な判断を行う上で、どういった情報を利用するかという点で重要である。

次に、各レベルにおける個々の知識の構成手法について考えよう。レベル1は、上でも述べたように現在の実務者の判断レベルに対応する段階である。したがって、この段階の知識の獲得手法は、実務者へのインタビューが基本となる。ただ、この場合でも、4.2.2で述べたようなダムによる洪水制御に本質的に内在する問題—計画洪水と同程度の規模の洪水は実務者が頻繁に経験できるものではなく、したがって実務者から聞き取りだけで知識を構成することは困難であるという問題—についての対処方法を考えておく必要がある。そこで、本研究では、実務者へのインタビューは、判断に当たってどのような項目を重視するのかを抽出するにとどめ、個々のルールの作成には過去の洪水とその調節記録を統計的に分析することから作成する方法をとる。また、レベル2以上の知識ベースについては、過去の洪水データについて採用しようとしている予測手法を適用し、その特性を調べることを通じて試行錯誤的に構築する必要がある。

## 4.3 多段階知識ベース構成法に基づく推論システムの設計

### 4.3.1 多段階知識ベース構成法における知識システム間の協調関係

本節では、4.2節で提案した多段階知識ベース構成法を用いた推論システムを設計する。多段階知識ベース構成法を実現するためには、問題解決のための知識とその利用手続きをモジュール化するとともに、各知識利用単位間の協調関係を実現しなければならない。このためには、第2章で開発した協調問題解決型洪水制御支援環境の推論システムの設計仕様が適している。しかし、多段階知識ベース構成法では、第2, 3章で用いた個々の知識システム内の持つ推論ルールの条件項目を分割して下位の知識システムとして分離するとともに、下位知識システムを統合するものとしてメタ知識システムを追加した知識システム群を実現しなければならない。さらに、全体としての洪水制御支援のための推論は、これら知識システム群の協調によって行われることになる。つまり、知識システム群内におけるメタ知識システムを中心とする協調と、知識システム群間の協調という2つのレベルの協調関係が推論システム内で実現されなければならない。

1つの考え方として、第2章で開発した知識システムの構造をそのまま拡張する方法がある。この知識システムは、知識ベースと推論のためのデータベースおよび推論機能を共通の性質として持つとともに、ある知識システムが推論実行中に解決できない問題があった場合には、推論システム内のすべての知識システムにその問題の解決を依頼する機能を持っていた(図4.2(a))。したがっ

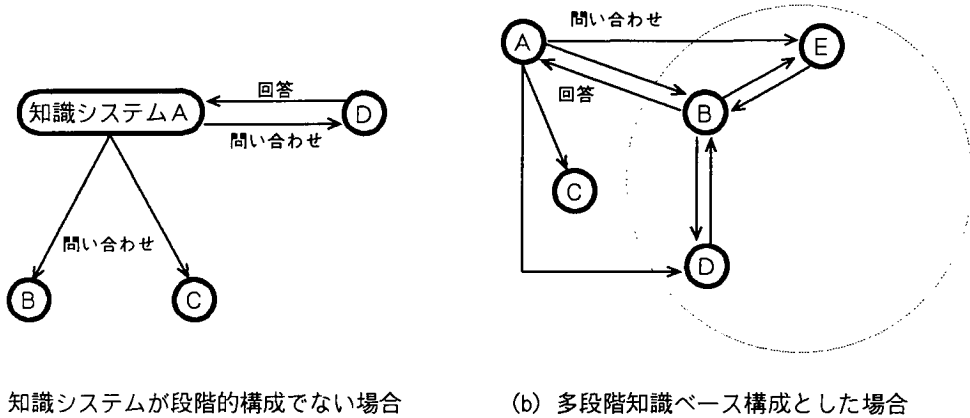


図 4.2: 独立した知識システム群による協調関係

て、この知識システムに

1. 複数の知識システムからの回答を受け取った場合に行うべき処理を知識ベースに書ける機能
2. 推論依頼に対して解決可能であるという返答をした知識システムの中にメタ知識システムがあればそれを優先的に呼び出す機能

を追加すれば、本研究でいうメタ知識システムとしての機能を追加することができる。この場合、通常の知識システムとメタ知識システムとの間には、システム設計上の差異はなく、実際の推論時の挙動を見て初めて特定の複数の知識システムが上で述べた知識システム群としての挙動を示しているということがわかることになる。この方法は、特に知識システムをその性質によって分類しないため、知識システム間の協調と知識システム群間の協調を区別しておらず構造的に簡単であるという利点がある反面、すべての知識システムがメタ知識システムの構造を持つことになり推論の実行効率は良くない。

例えば、図 4.2 (b) において、知識システム A が推論中に解決できない問題が生じたでしょう。この場面は、例えば、操作規則に基づいて放流量を決定しようとしている知識システムが、流入量の最大時期を判断する必要に迫られた場合などに対応する。このとき、知識システム A は、推論システム内に存在する残りの知識システム B, C, D, E すべてにこの問題の解決を依頼できるか問い合わせることになる。いま、この問題を扱うメタ知識システムとして B、異なるデータに基づいて実際にこの問題について判断結果を出力する知識システムとして、D, E があったとすると、B, D, E はすべて自分が解決可能であると返答することになる。したがって、A は、上で述べた手続きにしたがって B を選び出し推論依頼を行わなければならない。次に、メタ知識システム B は、推論依頼を残りのシステム C, D, E に送り、D と E の推論結果を受け取って自分の結論を出し、それを A に返すことになる。この例を見ればわかるように、本来推論システムの構造上明らかに依存関係のない知識システムへのアクセスが存在することになり、その負荷は知識システム数が多くなると無視できなくなると考えられる。

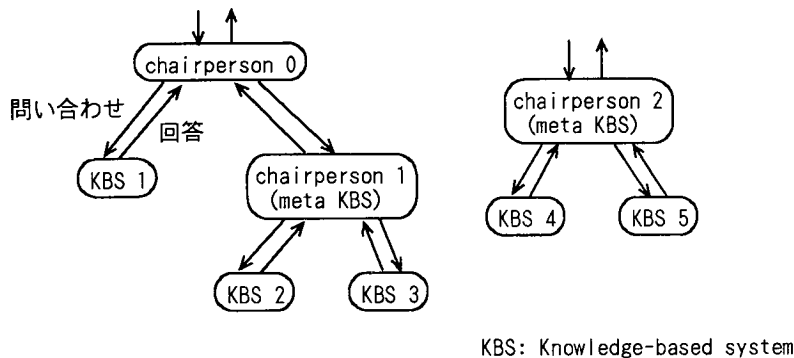


図 4.3: メタ知識システムを導入した場合の知識システム間の協調関係

そこで、本研究では、協調しあう必要のある知識システム間あるいは知識システム群間の情報の媒介および協調をおこなわせるシステムを新たに導入することにする。このシステムの持つ機能は、会議において出席者に意見を求め議題に対する答えを出すという議事進行を管理する機能であり、議長に似ているといえる。そこで、今後このシステムを議長型システムと呼ぶ。議長型システムを陽に導入することにより、知識システム間の不要なアクセスを抑えることができるとともに、知識システムの追加を行う際にもそのシステムを議長型システムに登録する手続きだけで簡単に協調推論の枠組みに取り込むことができる。そこで、次項で議長型システムの具体的な設計を行う。

#### 4.3.2 議長型システムの設計

前項では、メタ知識システムとその下位に位置する知識システムの関係から、多段階知識ベース構成法に基づく推論システムの設計指針として議長型システムが必要であることを指摘した。ところで、洪水制御支援のための推論システムにおいて議長的機能が必要になる場面には、メタ知識システムにおける場合だけでなく、推論システム全体を統括する場合があることにも注意しなければならない。後者は、放流量決定の推論に協力する知識システム全体を登録し管理する機能である。第3章で設計した協調問題解決型推論システムでは、この機能が推論システムそのものに実装されていたが、推論時の知識システム間の通信は、直接知識システム同士で行われていたため、通信の管理等の機能は持っていなかった。これは、知識システム間の協調が実際には放流量決定のために必要な判断項目間(例えば、流入量の最大時期の判定やダムの安全性に関する判断など)の協調に限られていたためである。しかし、メタ知識を中心とする知識システム群内の協調関係と従来行われていた判断項目間の協調を考えると、図 4.3 のように両者が自己相似的な形態を持っていることがわかる。したがって、判断項目にしたがって分けられたシステム(単独の知識システムの場合もあればメタ知識システムを中心とする知識システム群の場合もある)群の管理にも議長システムを用いることを考えた方が分かりやすい。

以上の点を念頭において設計した議長型システムの仕様を以下に示しておく。すなわち、議長

型システムは、

1. 推論開始の指示を受け取る機能
2. 自分の推論結果を上位システムに返す機能
3. 協調推論に参加する下位システムの登録機能
4. 登録されている知識システムへの推論依頼機能
5. 登録されているシステムからの問い合わせを処理する機能
6. 推論の終了を判断する機能
7. 観測データ参照システムへの問い合わせ機能
8. 推論結果あるいは推論過程の記録機能

を持っている。1. および2. の機能は、議長型システムがメタ知識システムとなっている場合にのみ必要な機能である。8. は、主として推論結果の説明に必要な情報を保持するための機能である。また、7. は、知識システムが推論過程で観測データを必要とする場合の処理であり詳しくは次項で述べる。

#### 4.3.3 データ参照システムの設計

メタ知識システムを用いた知識システム群内の協調関係を洪水制御支援のための推論システムで実現するためには、推論に用いる観測データの扱いにも注意しなければならない。第2, 3章で設計した協調問題解決型洪水制御支援環境では、推論に必要な観測データはすべて一括して推論開始前にデータ管理システムから推論システムに渡され、推論システム内の共有データベースに保存される構造になっていた。したがって、新たなデータが利用可能になりそのデータを用いる知識システムを推論システムに追加した場合は、推論環境管理システムの修正が必要になる。また、近年得られるようになったきた衛星やレーダ画像などの情報を直接推論に用いるような場合には、大量のデータを事前に推論システム側に転送し保持しておくことは効率性の上で問題がある。さらに、本研究で提案する段階的知識ベース構成法によって知識ベースのモジュール化を進めると、すべての観測データがすべての推論過程で必要になるとは限らないので、特にこの点には注意する必要がある。

一方、ダム管理の現場では、時々刻々入手される観測データの管理は既存の計算機によって行われている。また、近年、観測データの管理や解析にはエンジニアリングワークステーション(EWS)を用いる動きがあり、今後は、EWSによるデータ一括管理も進んでいくと考えられる[15]。

そこで、本研究では、観測データ管理システム(推論システムとは別の計算機上で稼働している)とのインターフェースとして、新たに観測データ参照システムを推論システム内に置き、先に述べた議長型システム(推論システム全体を統括するシステムとメタ知識システム)がこれにアクセスできるようにする。すなわち、各知識システムが自分の推論過程で何らかのデータが必要になった場合は、自分の上位にある議長型システムにそれを依頼し、議長型システムが観測データ参照シ



システムと通信することによりデータを当該知識システムに返す構造にする。もちろん、実際のデータ管理は推論システムが稼働する計算機とは異なる計算機上で動くデータ管理システムで行われており、推論システム内に存在するデータ参照システムは、それにアクセスして必要なデータをその都度推論システム側に得る機能を持つだけにしておく。この機能の実現には、異なる CPU 間の通信が高速かつ確実に行える必要があるが、この点は、次の節で述べるネットワークプログラミングの手法を用いることにより可能である。したがって、データ参照システムの導入により、事前にすべての観測データを推論システムに転送し推論システム側でも管理するというデータの二重管理を避けることが可能になる。

#### 4.3.4 メタ知識システムの設計

4.3.2では、推論システム内の2種類の協調関係、すなわち、一つの判断項目に対して複数の情報源から一つの結論を導き出す場合の協調(メタ知識システムを中心とする知識システム群内の協調)と、判断項目によって分類された知識システムあるいは知識システム群間の協調とを管理するために必要となる共通の機能を備えた議長型システムを設計した。したがって、メタ知識システムは推論機能を備えた議長型システムと定義することができる。推論機能そのものは、既に第2, 3章で知識システムの設計において実現した定義を用いることにする。

このように、個々に定義された単一の機能を持つシステムからそれらの機能を融合したシステムを記述するには、オブジェクト指向プログラミング<sup>1</sup>の提案しているクラスおよびクラス間の継承の手法<sup>2</sup>が適している[16] 本研究では、Symbolics 社製のオブジェクト指向 Lisp 環境 Genera システム[17]を用いて、推論システムの記述を行った。以下、クラスおよびその継承関係を用いてメタ知識システムの構成を述べる。

図 4.4 は、プロダクションルールをメタ知識の表現形式とするメタ知識システムの構造を示した図である。クラス `chairperson` は、4.3.2で設計した議長システムを定義している。すなわち、`chairperson` で記述された仕様にしがって計算機上に発生させたインスタンスは、協調関係にある知識システムを登録・管理し、知識システム間の通信を司る。

また、クラス `es` は、プロダクションシステムによる推論を行うための知識システムの基本的な使用を定義するクラスである。すなわち、クラス `es` に記述された仕様にしがって作成したインスタンス(知識システム)は、知識ベース データベース 推論機構を持ち、プロダクションシステムによる推論を行う。ただし、この時点で他の知識システムに推論を依頼する機能は、持っていない。

クラス `es-with-chairperson` は `es` の下位クラス(クラス `es` の機能を引き継いだクラス)で、新たに、自分が参加する協調推論の議長が誰であるかを登録し、それと通信する機能を追加している。したがって、このクラスの仕様にしがうインスタンスは、自分の知識ベースによる推論を行う一方で解決できない問題に遭遇すると議長型システムを通じて、他の知識システムに推論を依頼することができる機能を持つ。この意味で、`es-with-chairperson` は、第2, 3章で開発した協調問題解決

<sup>1</sup>オブジェクト指向プログラミングでは、処理に必要な単位を、すべてデータとそれを扱う手続きを持ったオブジェクトと考える。このオブジェクトの仕様を定義するのがクラスである。また、クラスに定義された内容にしがって発生させられたオブジェクトをそのクラスのインスタンスという。本研究の場合、クラスを用いて知識システムの構造を定義し、そのインスタンスとしてそれぞれの判断項目を扱う個々の知識システムを計算機上に発生させることになる。

<sup>2</sup>クラスは階層的に定義することができ、下位クラスは既に定義されている上位クラスの性質をすべて引き継ぐことができる。なお、上位クラスとして一つのクラスしかとれない場合をサブクラシング、2つ以上の上位クラスの性質を引き継げる機能を多重継承という。前者は `smalltalk`、後者は `Lisp`, `C++`などの言語で採用されている。

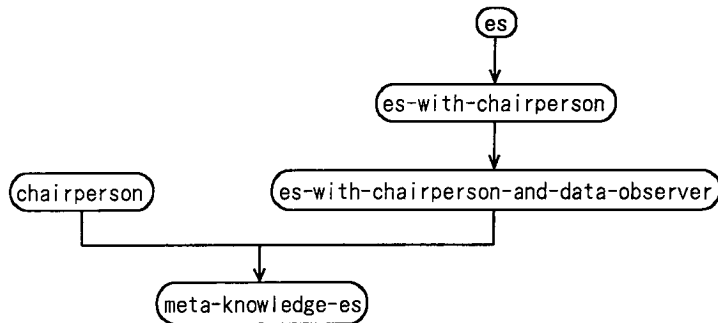


図 4.4: プロダクションシステムを用いるメタ知識システムの定義

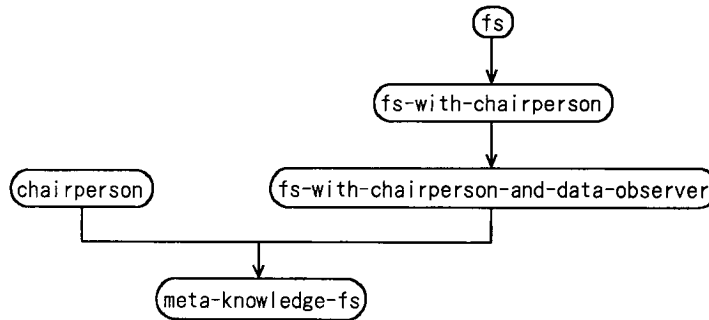


図 4.5: ファジイ推論を用いるメタ知識システムの定義

型推論システムを構成する知識システムに該当する。

クラス `es-with-chairperson-and-data-observer` は、`es-with-chairperson` の機能を引き継いだクラス (下位クラス) で、新たに、観測データ参照システムへのアクセス機能を追加している。したがって、このクラスのインスタンスは、プロダクションシステムによる推論機能、他の知識システムへの推論依頼機能、観測データへの参照機能を有しており、本研究で用いる推論システムを構成する基本的な知識システムである。ダム操作規則を参照する知識システムや単位時間当りの放流量の増減に関する制限事項を参照する知識システムなどは、このクラスのインスタンスとして計算機上に発生させることになる。

さて、メタ知識システムは、既に述べたように構造的には推論機能を持つ議長型システムであった。ところで、議長型システムはクラス `chairperson` によって定義されており、知識システムはクラス `es-with-chairperson-and-data-observer` によって定義されている。したがって、メタ知識としてプロダクションルールを持つメタ知識システムを表すクラスは、この2つのクラスを多重継承することによって定義することができる。

なお、メタ知識としてファジイ推論ルールを持つメタ知識システムを表すクラスは、`es` に対応するクラスをファジイ推論を定義するクラス `fs` で置き換えることで容易に構築することができる (図 4.5 参照)

## 4.4 推論システムと手続き型知識システム・データ管理システムとの協調

ダム操作には流量・雨量などの多種・多様なデータが必要になるので、洪水制御支援システムにもそのデータを容易に取り入れる必要がある。また、今後、流入量予測システムなどの新しい技術が導入されたときに、ダム操作支援システムにはその技術を容易に利用できることが要求される。さらに、流出予測などの既存ソフトウェアと洪水制御支援システムとのインターフェースについても考えておく必要がある。もちろん、洪水制御支援システムは、既存のシステムが稼働している計算機とは別の計算機上で稼働するので、洪水制御支援システムとそれ以外に利用可能なシステムとの通信を不便に行えるために、計算機間の情報交換の方法を考えなければならない。第2, 3章で設計した洪水制御支援環境では、RS-232Cを通じて洪水制御支援システム側が観測データの管理や手続き型処理を行う計算機の端末になることで、計算機間の情報交換を行っていた。しかし、この方法では、情報交換が必要になるたびに相手側計算機との接続を確立し、相手側計算機のソフトウェアを起動する必要がある、通信にかかる負荷が大きく、データ転送速度や信頼性も高いとはいえなかった。

一方、計算機間の情報交換の手法として現在注目されている方法にLAN<sup>3</sup>がある。LANとは、比較的狭い地域内でコンピューターをネットワーク化したものをいう。この通信方法は、ワークステーションやパーソナルコンピュータをイーサネットケーブルを用いてネットワーク化することで1台1台が単独であるときよりも効率のよい使い方ができるということで現在注目されている。そこで、本研究では、EWS<sup>4</sup>で標準規格になっているLANを用いたRPC<sup>5</sup>を使用しデータ収集シミュレータや予測システムとの通信を行う機構を開発する。RPCとは、あるCPU<sup>6</sup>で実行している関数から他のCPUで実行している関数を呼び出すことのできる機能である。RPCには、一般に次のような利点がある。

1. 2つの関数は同じ言語で書かれていようとも、異なる言語で書かれていようともどちらでもよい。
2. 2つのCPUは同じタイプのCPUでも異なったタイプのCPUでもよい。
3. RPCを用いて、あるCPU上だけでしか利用できない機能を他のCPUで走っているプログラムが使用することができる。
4. RPCを用いれば、プログラムを分割し異なったCPU上でプログラムを動かすことができる。
5. 平行処理をすることにより性能をあげることができる。
6. プログラムが動作するのに適したOSやCPU上で動かすことができる。
7. お互いに他のプログラムがどのように動いているかを気にする必要はない。
8. 計算機どうしが物理的に離れていても、近くでも動作可能である。

---

<sup>3</sup>Local Area Network

<sup>4</sup>Engineering Work Station

<sup>5</sup>Remote Procedure Call 遠隔手続き呼び出し

<sup>6</sup>Central Processing Unit 中央処理装置

以上の特徴を考慮すると、推論システム、データ管理システム、手続き型データ処理システムの稼働する計算機間の情報交換機能をRPCとして定義すれば、各システムの内部使用が他のシステムに依存したりすることはなく、独立したシステムとする事が可能になる。また、データ管理システムや手続き型データ処理システムが既に存在する場合でも、ネットワークからの問い合わせに答える機能をつけ加えるだけで本研究で設計する推論システムとの共存が可能になる。さらに、洪水制御の場面では、データ管理システムや手続き型知識システムはそれ自身行うべき処理の負荷が高いが、RPCを行えるインターフェースをつけることにより、平行処理も可能になり全体としての処理能力を高めることも可能である。

そこで本研究では、推論システムを構成する各知識システムに、手続き型知識システムの持つ流量予測などの機能をRPCによって呼び出すための機能を付与している(図4.6参照)。すなわち、ある知識システムが推論過程で流出予測など手続き型システムによる処理が必要になった場合には、ネットワークを通じてその処理を行える計算機に依頼を発信する。そして、予測計算が行った結果を再びネットワークを通じて受信し、推論を続行することになる。また、既に述べたデータ参照システムが実際に必要なデータを別の計算機上で稼働しているデータ管理システムから得る手順もRPCを用いるようにしている。これにより、推論システム側で推論に必要な観測データを管理する必要はなく、各知識システムが推論過程で必要になったデータを随時、他計算機上で稼働するデータ収集システムからネットワークを通じて得ることができ、データ管理が二重になることなく信頼性の高い通信が行えるようになっている。

なお、本研究では、推論システムの開発にSymbolics社製UX400Sを用いている。これは人工知能システムの開発に適したLISP環境を動作させる専用のCPUとメモリーを搭載したボードで、東芝社製エンジニアリングワークステーションAS4330のVMEbus<sup>7</sup>に差し込んで使用する形態になっており、AS4330との通信に限っては互いのメモリー間のデータ転送ですむようになっている。したがって、上に述べたRPC手続きによる通信も物理的にはいったんネットワークを経由する必要がなく高速に行える。そこで、次章の適用例では、AS4330上で手続き型知識システムとして流量予測シミュレータを、またデータ管理システムとしてデータ収集シミュレータを稼働させてUX400S上の推論システムと協調させる構成とした。もちろん、通信手順はネットワークの場合とまったく同じであり、これら三者がネットワーク上で物理的に離れた場所にある計算機で稼働していてもまったく同じように協調させることができる。

## 4.5 適用と考察

ここでは、本章で開発した多段階知識構成法による洪水制御支援システムを天ヶ瀬ダムの洪水調節操作の支援に適用する。対象貯水池システムおよび対象洪水は、第3章と同じである。ただし、知識の作成に当たっては、1965年24号、1972年20号、1976年17号、1982年10号、1983年10号の各台風による出水データを参考にしている。

<sup>7</sup>計算機のCPUおよびメモリーと直接周辺装置の通信を行うインターフェース

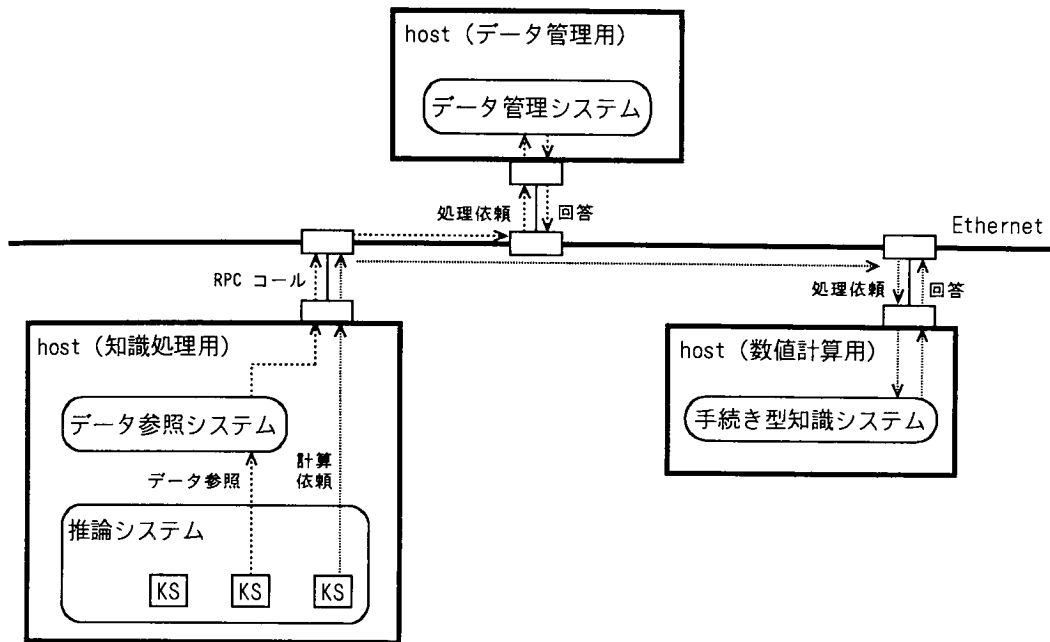


図 4.6: LAN を利用した分散型洪水制御支援環境

#### 4.5.1 知識ベースの構成

天ヶ瀬ダムの洪水時の操作を対象とした推論システムについては、第3章で合計8個の知識システムからなる構成を示した。ただし、ここで用いていた知識構成は、4.2.2で示した多段階知識ベース構成法によれば、レベル0の段階である。そこで、ここでは、これら知識システムの内、流入量の最大時期を判断する知識システム、枚方地点水位の最大時期を判断する知識システム、ダム容量に二次調節を行う余裕があるかどうかの判断を行う知識システムの3つを例に取り、レベル1及びレベル2の知識構成を行う。以上3つの判断項目に対するメタ知識システムの構造については、適用結果をもとに考えることにする。なお、本適用例で用いた推論システムの全体構成を図4.7に示しておく。

流入量が最大に達したかどうかの判断を行う知識システム群

貯水池流入量の最大時期の判断を行う知識システム群として、

1. ハイドログラフの形状から流入量ピークを判断する知識システム
2. 流域降雨量から流入量ピークを判断する知識システム
3. 流入量予測システムの出力値をもとに判断する知識システム

の3つを考えることにする。前二者が、いわゆる経験的判断を表す部分であり、この2つの知識システムとメタ知識システムのみで判断を行う場合は、レベル1の構成ということになり、3を加えればレベル2の構成となる。

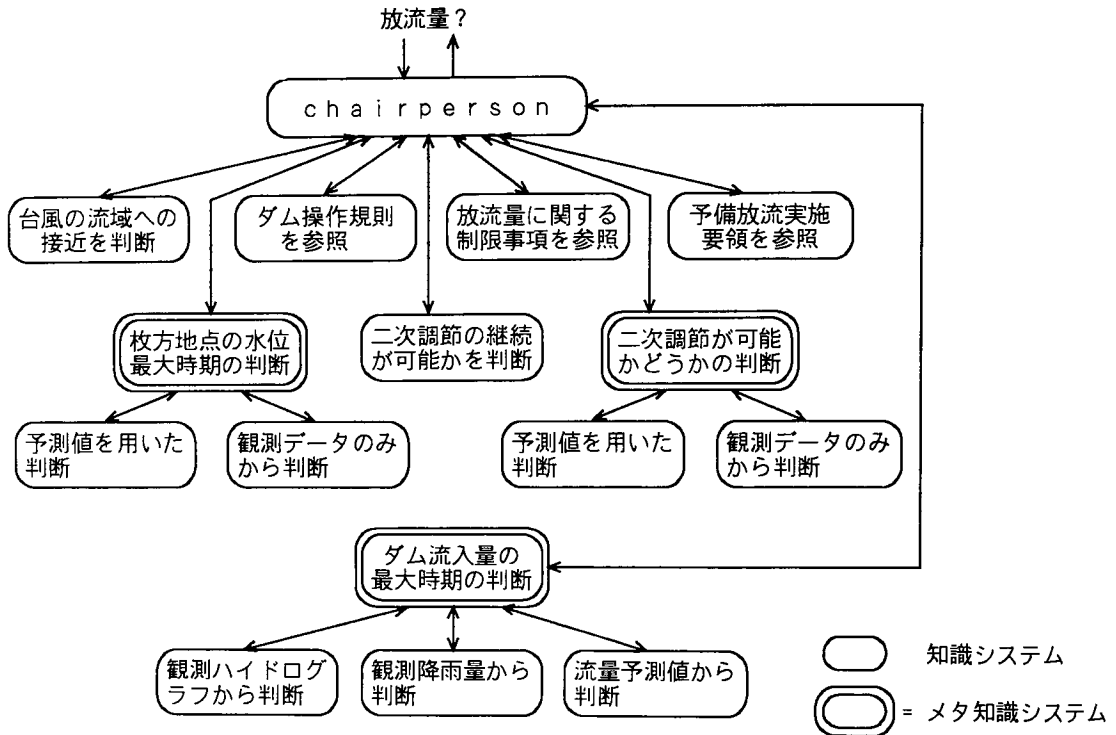


図 4.7: 多段階知識ベース構成法による推論システムの全体構成

まず、ハイドログラフの形状から流入量ピークを判断する知識システムはファジィ推論を行うこととし、前件部は、観測最大流入量  $x_1$ 、流入量最大値を観測してから現在時刻までの経過時間  $x_2$ 、観測最大流入量と現在の観測流入量との差  $x_3$ 、観測最大流入量にいたるハイドログラフの傾き  $x_4$  の4変数を用いている。 $x_1$ については、知識作成に用いた5ケースの洪水中、 $1200\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量極大点はすべてピークとなっており、最も小さいピークは1976年17号台風の $842\text{m}^3/\text{s}$ となっている。そこで、 $x_1$ をlarge, medium, smallの3つの正規ファジィ集合で表現することにし、 $1200\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量はlargeのグレードが1となるように、 $840\text{m}^3/\text{s}$ 以下の流量はsmallのグレードが1となるようメンバーシップ関数を定めた。 $x_2$ については、まず、流入量の極大点以降その値を越える流量が生起するまでの時間間隔を調べた。その結果、 $840\text{m}^3/\text{s}$ を越える極大点15サンプルについて、平均5.6時間、標準偏差4.2時間となったので、 $x_2$ を台集合とするlong, medium, smallの3つのファジィ集合を、平均値でmediumのグレードが1、平均 - 標準偏差以下および平均 + 標準偏差以上でそれぞれsmall, largeのグレードが1となるように定めた。 $x_3, x_4$ についても同様にサンプルケースの平均値 標準偏差をもとに3つのファジィ集合で表現した。また、後件部変数は、流入量ピークを過ぎたという事象の確からしさを0～1の値で表し、これを5つのファジィ集合に分割している。なお、これら前件部変数と後件部のファジィ集合の組み合わせは、3.3.2による方法で前件部変数の重みは、すべて同じとして定めた。

流域降雨量から流入量ピークを判断する知識システムもファジイ推論を行う構造とし、前件部は、過去3時間分の観測雨量から前回の推論時(15分前)における3時間分の総雨量を引いた値、観測最大降雨量に対する現在時刻の降雨量の割合の2変数を用いており、後件部は上と同様に「流入量ピークの生起時刻を過ぎた」という事象の確からしさである。

流入量予測システムの出力値をもとに判断する知識システムでは、 $q_p$ を観測最大流入量とし、 $q_{max}$ を予測流入量系列の中の最大値とし、 $q_{max} / q_p \geq 1$ のとき流入量最大である確信度を0と、 $q_{max} / q_p < 1$ のとき、

$$1 - \frac{1}{\sum_i w(i)\Delta t} \sum_i \frac{q(i)}{q_p} w(i)\Delta t$$

を流入量最大である確信度として用いている。

枚方地点水位が最大に達したかどうかの判断をする知識システム群

枚方地点の水位が最大に達したかどうかの判断を行う知識システム群として

1. 観測データのみを用いる知識システム
2. 枚方地点水位予測システムからの出力値を用いて判断する知識システム

の2つを考える。1がレベル1に対応する知識システムであり、推論システムをレベル2に成長させる際に2を加えることになる。

観測データのみを用いる知識システムでは、判断ルールをファジイ推論ルールで表現しており、前件部変数としては、観測最大水位を与えた時刻からの経過時間、高浜地点の流量変動の2つを用いている。後件部は、「枚方水位が最大に達する前である」という事象の確からしさである。また、枚方地点水位予測システムからの出力値を用いて判断する知識システムでは、流入量最大と同じ方法によって「枚方水位が最大に達する前である」という事象の確からしさを求める。

ダム容量に二次調節を行う余裕があるかどうかを判断する知識システム群

ダム容量に二次調節を行う余裕があるかどうかを判断する知識システム群は、

1. 観測データのみから判断を行う知識システム
2. 流入量予測と枚方水位予測の出力値から判断を行う知識システム

から構成する。まず、観測データのみから判断を行う知識システムについて考える。二次調節に必要な容量を判断するためには、二次調節を継続すべき時間<sup>8</sup>とその間の貯水池流入量という2つの予測要素が必要になる。したがって、現実には観測値のみから判断を行うことは非常に難しい。そこでここでは、過去の二次調節時間を参考にしてその時点の流入量の通減率<sup>9</sup>を用いて二次調節を行う余裕があるかどうかをファジイ推論によって考えることにする。推論に用いる前件部変数は、判断時刻でのダムの空き容量と二次調節による増加貯水量の差と、ダムの空き容量およびダム流入量である。二次調節による増加貯水量は、過去の5つの洪水データを参考に、二次調節継続時間を

<sup>8</sup>枚方地点の水位が最大に達するまでの時間

<sup>9</sup>現在時刻より過去3時間分の流入量観測値に最小2乗法で直線をあてはめ、その傾きを通減率としている。

8時間と仮定し、現在ダム流入量とその逓減率から8時間分の二次調節による増加貯水量を求めている。後件部は、「二次調節を行う余裕がある。」という事象の確からしさである。

流入量予測と枚方水位予測の出力値から判断を行う知識システムでは、枚方地点の水位予測値から二次調節継続時間をもとめ、これと流入量予測システムの出力値から二次調節終了時の貯水量を求め、その貯水池容量に対する割合を「二次調節を行う余裕がある。」という事象の確信度として用いることにする。

#### 4.5.2 適用結果と考察

##### レベル0の知識構成の適用—流入量最大時期の判定—

ここでは、多段階知識ベース構成法の適用性と問題点を探るため、流入量最大時期の判断を行う知識システムについて、レベル0すなわち観測データのみに基づく判断の詳細を検討する。

まず、4.5.1で設計した知識システムの内、観測ハイドログラフおよび観測雨量から判断を行う知識システムを用いて、1965年24号台風について流入量ピークの判定を行った例を図4.8に示す。図4.8(b)は、観測ハイドログラフの形状のみを参照する知識システムの出力確信度である。この場合の出力確信度は、流入量が実際にピークに達した時点で0.5程度となり、以後時間がたつにつれて上昇していくという結果になった。また、(c)は雨量のみを参照する知識システムの出力確信度である。この場合は、流入量がピークに達した時点で0.7程度と比較的高い確信度を示したが、流入量がピークに達する以前にも高い値を示し、降雨の変動に対して敏感に反応するという結果になった。このことから、雨量データのみから流入量ピークを判定する知識システムは、流入量がピークに達した時点での確信度を上げるようにするだけの補完的な役割をするのに適していると考えられる。そこで、両者の出力を調整するメタ知識システムに、降雨があるときは流量データを用いるシステムと雨量データを用いるシステムの出力値を4:1にするというルールを与えた。この結果、図4.8(d)のようにハイドログラフから流入量ピークを判定したときに比べ流入量ピークに達した時点の確信度を上げることができた。また、雨量情報のみから流入量ピークを判定したときに比べ、流入量ピークに達する以前の確信度の上昇をおさえるという結果になった。もちろん、重み付けという方法は、メタ知識システムを構成するルールの中で最も単純なものであり、この他に、例外的事象生起の有無のチェックなどの機能を取り入れていく必要があると考えられる。

##### 洪水調節支援シミュレーション

ここでは、4.5.1で設計した推論システムを用いて1982年10号台風による洪水に対して貯水池操作支援シミュレーションを行う。対象期間は、8月1日0時から8月2日24時までの48時間である。

まずはじめに、予測システムを用いないで判断を行う知識システム群のみによるケースを考えよう。これは、経験的判断のみによる操作に該当する。図4.9(a)は、支援システムの推薦する放流をそのまま行ったときの制御結果である。このケースでは、枚方水位が4.5mになる時刻は8月2日3時45分、二次調節開始時刻は8月2日5時15分であった。また、二次調節を終了した時刻は8月2日7時30分で、二次調節継続時間は2時間15分となっている。枚方地点での最高水位は8月2日6時00分の4.95m、ダム最大貯水量は8月2日7時30分の $12650000\text{m}^3$ であった。



図 4.9 (b) は、流入量最大時期の判断を行う知識システム群の出力確信度である。図からこれら知識システム群は、8 月 2 日 3 時 45 分から 5 時 15 分の 1 時間 30 分の間に推論を依頼されていることがわかる。この判断は一次調節を終了し二次調節に移る際に必要となるものであるが、枚方地点の水位が 8 月 2 日 3 時 45 分に警戒水位を越えているので、同時刻より 5 時 15 分までの 1 時間 30 分の間推論を依頼されるという結果になっている。ハイドログラフの形状から流入量最大時期を判断する知識システムの出力確信度は比較的高く、はじめて依頼された時刻の確信度 0.7 から最後に依頼された時刻の確信度 0.9 まで上がり続けている。これは、流入量の減少と推論時刻以前の最大流入量からの経過時間が増えていくことによるものである。判断材料に流域雨量を用いる知識システムの出力確信度はほぼ 0.7 で変化していない。この理由は図 4.9 (a) を見ればわかるように、降雨が終わりに近付き降雨量も少なく変化もなくなったからである。これらの結果、これら 2 つの知識システムを統括するメタ知識システムの出力確信度は、推論期間中 0.7 から 0.8 に上がっている。

図 4.9 (c) は今後貯水池に二次調節を行う余裕があるかの判断について、観測データのみから判断を行う知識システムの出力確信度をグラフにしたものである。この知識システムは 8 月 2 日 3 時 45 分から 5 時 15 分の 1 時間 30 分の間推論を行っている。知識システムの出力確信度は、5 時に急激に上がっている。これは、流入量が減ったことおよび流入量の遞減率が大きくなることによると考えられる。図 4.9 (b), (c) を比べれば、

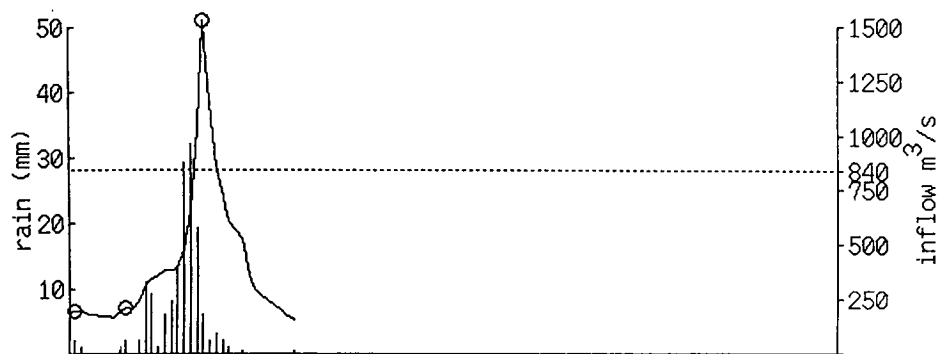
1. 3 時 45 分に枚方地点の水位が警戒水位を超えることで二次調節の前提条件が満たされ貯水池流入量の最大時期を判断する知識システム群が稼働を始めたこと、
2. この知識システム群はこの時点で流入量の最大時期はすぎたと判断していること、
3. しかし、貯水池二次調節を行う余裕があるかを判断する知識システムが、4 時 45 分になるまで貯水池容量が不足する可能性があるかと判断していること

がわかる。

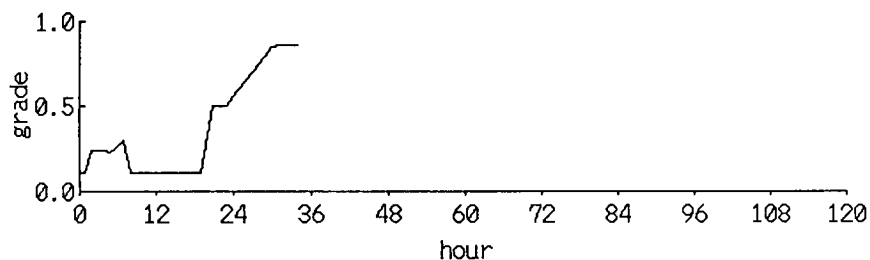
次に、レベル 2 の知識構成を考えよう。貯水池流入量・枚方地点水位の予測システムとして、2.5.2 で示した予測シミュレーションモデルを用いることにし、流入量最大時期、貯水池空き容量、枚方地点水位最大時期の判断を行う知識システム群に、このモデルからの予測値を判断材料とする知識システムを追加する。なお、各判断について最終的な確信度を出力するメタ知識システムのもつ判断ルールとして、流入量最大時期に関する判断を行うものについてはすべての下位知識システムの出力を同等に扱うものとし、貯水池空き容量・枚方地点水位最大時期の判断を行うシステムは、観測データに基づく判断と予測情報を用いるものとの出力を 2:1 の重みで採用することにしていく。図 4.10 は、以上の知識構成による洪水制御支援システムの運用例である。ここで用いた予測シミュレーションでは枚方水位予測システムの性能が悪くその出力値を用いた知識システムの出力確信度の変動が大きい。メタ知識システムにおいてこの知識システムの出力確信度の重みを低く設定したため、最終的にはメタ知識システムの出す確信度の変動を小さくすることができた。そのため二次調節が長くなり、枚方地点の水位を、最高値は変わらないものの、全体として低くすることができた。

以上、本適用例では、多段階知識構成法を用いて観測データのみに基づく純経験的なレベルを行うシステムから、流出予測システムを利用した判断を行うレベルへ実際にシステムを成長させ

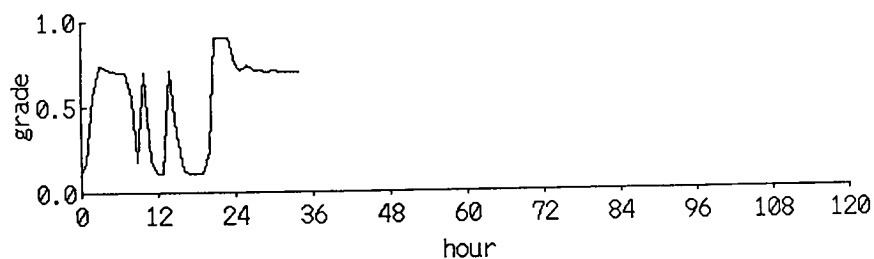
る過程を模擬してみた。この結果から、本研究で提案した段階的知識ベース構成法を用いることによって各レベルの知識システムの特性を把握することができるとともに、これらの知識の整合性を保ちつつ洪水操作支援を行えることが確認できた。ただし、現時点では、メタ知識システムの持つべき知識(本適用例では下位知識システムの結論に与える重み)の作成は試行錯誤によっており、今後、洪水制御シミュレーションの結果と実務者の知識の双方を取り入れつつメタ知識を作成する方法について考察を進めていきたい。



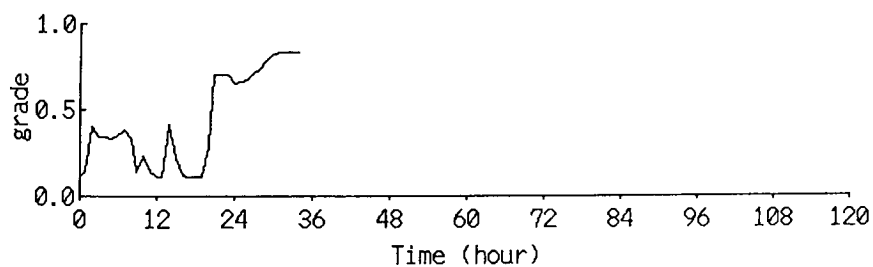
(a) 1965年24号台風時の流域平均雨量と流入量



(b) 観測ハイドログラフの形状から判断した場合の出力

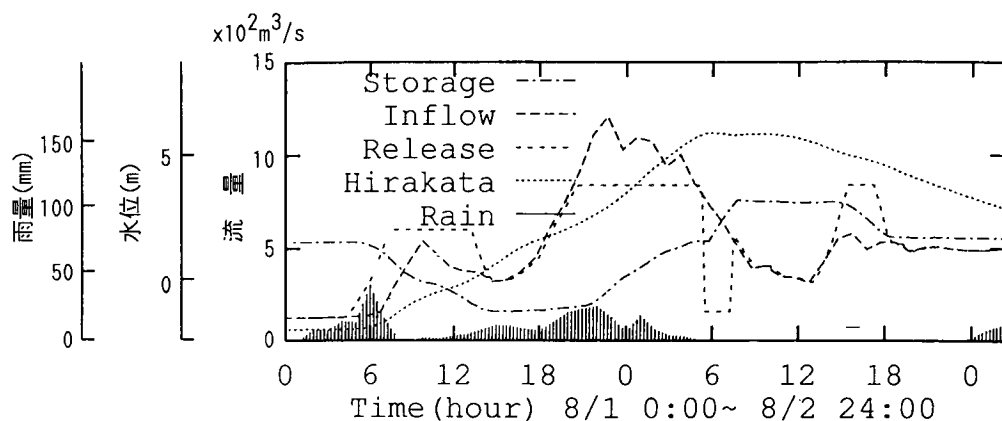


(c) 観測雨量データのみから判断した場合の出力

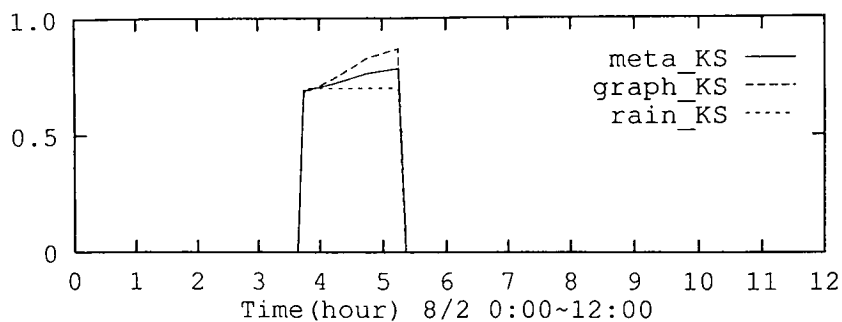


(d) メタ知識システムによる出力

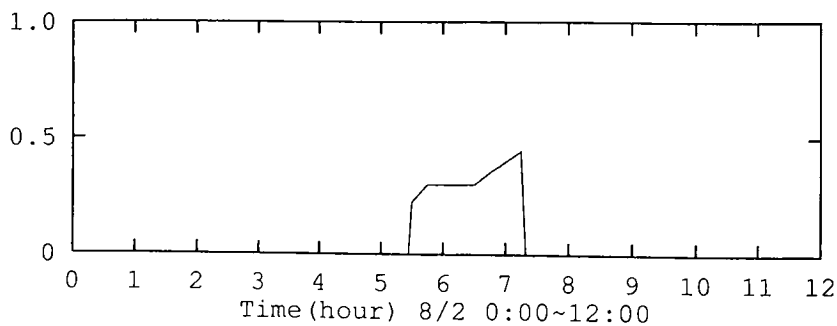
図 4.8: 流入量最大時期の判定例



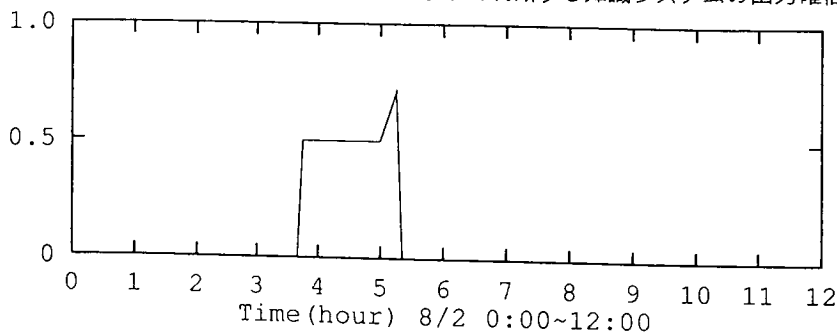
(a) 操作結果の概要



(b) 流入量最大時期の判定を行う知識システムの出力確信度

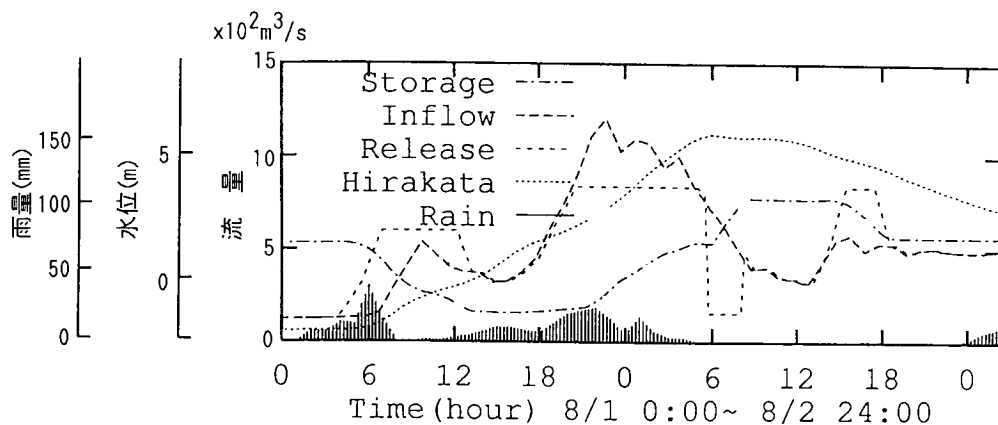


(c) 貯水池に二次調節を行う余裕があるかどうかを判断する知識システムの出力確信度

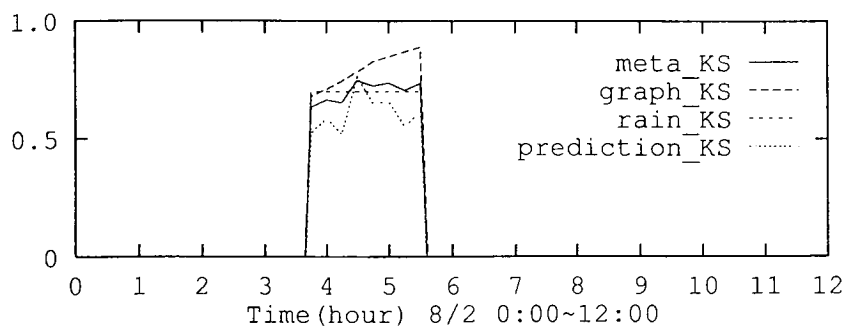


(d) 枚方水位最大時期の判定を行う知識システムの出力確信度

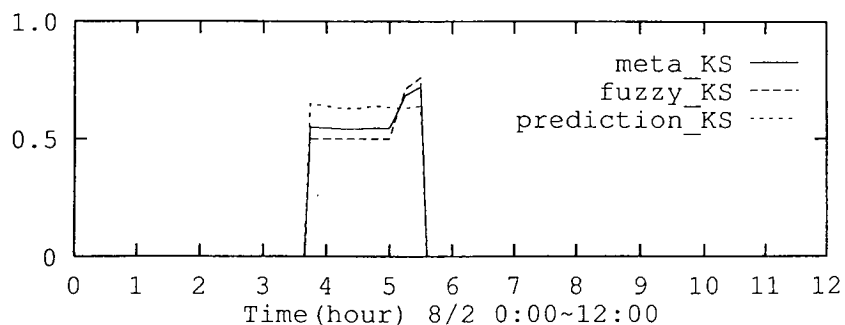
図 4.9: レベル1の知識構成によるシステムの運用結果



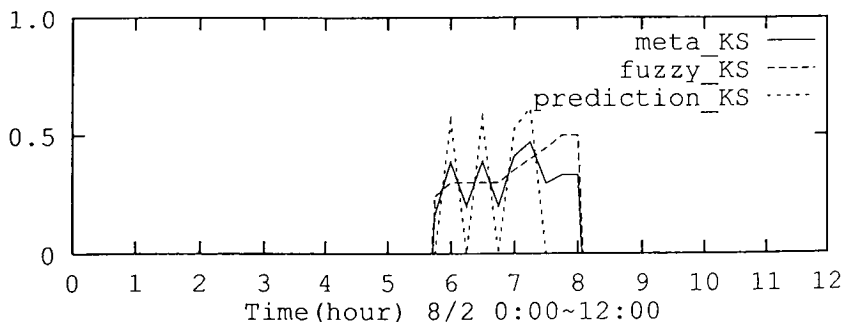
(a) 操作結果の概要



(b) 流入量最大時期の判定を行う知識システムの出力確信度



(c) 貯水池に二次調節を行う余裕があるかどうかを判断する知識システムの出力確信度



(d) 枚方水位最大時期の判断を行う知識システムの出力確信度

図 4.10: レベル2の知識構成によるシステムの運用結果

## 4.6 結語

本章では、知識ベースに基づく貯水池操作の支援という手法が直面している問題、すなわち、プロトタイプとして作成された洪水制御支援システムをいかに成長させていくべきかという問題について考察した。以下、本研究で得られた成果をまとめておく。

1. 現在までに提案された洪水制御支援知識ベースシステムを知識の獲得及び構成法といった観点から分析することを通じて、今後、これらシステムを成長させ実用的なシステムにしていくなぎには、
  - (a) 現時点での実務者の知識を格納しているだけでなく、降雨予測や流出量予測といった新しい技術やシステムを利用するための知識を容易に格納することのできる環境を持っていること、
  - (b) 知識を構成する論理が理解しやすい構造であること、
  - (c) 各ダムに定められている操作規則の遵守を保証する知識構成であること、が必要であることを示した。
2. 上記条件を満足するとともに、新しい情報に基づく知識を導入した際に問題となる既存知識との整合性を解決する枠組みとして多段階知識ベース構成法を提案した。
3. 多段階知識構成法に基づく推論システムの実現に不可欠な要素として議長型システム メタ知識システムを設計するとともに、これらを用いてメタ知識システムを頂点とする知識システム群内での協調推論、および知識システム群間の協調推論を実現する環境を構築した。
4. 洪水制御支援システムを構成する推論システム・データ管理システム 手続き型知識システムそれぞれの処理負荷を軽減させるとともに現場での計算機構成にも対応するため、これら各システムを異なる計算機上で稼働させローカルエリアネットワークを通じた情報交換が行える環境を実現した。

また、今後の課題として以下の点が挙げられる。

1. 適用例では、実際に流出予測計算を行うのではなく、予測シミュレータを用いた分析に終わったが、システムをより現実的なものとしていくためには、実際に種々の精度を持つ流出予測ソフトウェアと組み合わせた分析を行う必要がある。
2. 現時点では、メタ知識の作成は試行錯誤的に行ったが、洪水制御シミュレーションの結果と実務者の意見を取り入れつつ、系統的にメタ知識を作成する手法を開発する必要がある。
3. 本研究では、単一ダムの操作支援に限定した適用のみを対象としたが、今後複数ダムの統合操作をも対象とした支援に、本手法を適用しその可能性と問題点を探る必要がある。

## 参考文献

- [1] 井辻英雄・山根伸之 岡田耕：水文・水資源問題における AI 研究の動向，水文 水資源学会誌，Vol. 4, No. 2, pp. 55-58, 1991.
- [2] 椎葉充晴 堀智晴・岡田耕：土木工学へのエキスパートシステムの適用と可能性 3.3 水工学分野，平成 4 年度土木学会関西支部講習会テキスト，pp. 59-76, 1992.
- [3] 溝口理一郎：エキスパートシステムの新しい動向，水文・水資源研究のための AI 技術の利用に関する講座，水文 水資源学会，pp. 32-49，1991. 知識構成からみたダム操作支援知識ベースシステムの現状と課題
- [4] 神田徹・井辻英雄 上田至宏：ダム洪水調節操作支援エキスパートについて，水文・水資源学会誌第 2 巻 2 号，pp. 33-39, 1989.
- [5] 岩下修・西川和也・福西祐・日向博文：ダム集中制御のためのエキスパートシステムの開発，土木学会水工学論文集第 34 巻，pp. 583-588, 1990.
- [6] 梅田昌郎・伊東一正・秋葉努・深見親雄：洪水管理に適用するエキスパートシステムの研究(その 2)，水文・水資源学会 1990 年研究発表会要旨集，pp. 266-269, 1990.
- [7] 山口高志・中山比佐雄 伊東一正・秋葉努：洪水管理に適用するエキスパートシステムの研究(その 3)，水文・水資源学会 1991 年研究発表会要旨集，pp. 91-94, 1991.
- [8] 高見至・渡辺邦男・浜田次郎・北山和典：ダム操作支援のための AI システムの構築，水文 水資源学会 1990 年研究発表会要旨集，pp. 262-265，1990.
- [9] 小尻利治・藤井忠直：ファジィ貯水池操作におけるメンバーシップ関数の決め方，水文・水資源学会 1989 年研究発表会要旨集，pp. 87-90, 1989.
- [10] 小尻利治・藤井忠直：知識ベースを用いた貯水池の実時間操作に関する研究，土木学会水工学論文集第 34 巻，pp. 601-606, 1990.
- [11] 榊間繁樹・小尻利治：ニューロ概念よる貯水池の実時間操作，土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集，pp. 264-265, 1991.
- [12] 大石哲・池淵周一・井辻英雄：定性的推論を用いた実時間制御支援システム，土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集，pp. 276-277, 1991.

- [13] 上林好之：レーダー雨量情報を利用した洪水流出予測に関する研究，河川情報研究所報告第4号別冊-1，1990.
- [14] 山口高平：深い知識に基づく故障診断診断型エキスパートシステム，京都大学大型計算機センター第25回セミナー「エキスパートシステムの現状と将来」資料，1989.
- [15] 上林好之 山崎丈夫・深沢芳雄・松尾敏幸：次期端末機の検討，河川情報研究所報告第4号，河川情報センター，1990.
- [16] Cox, B. J. オブジェクト指向のプログラミング，前川守監訳，トッパン，pp.37-48，1988.
- [17] Symolics Inc.: Symobolics Common Lisp Programming Constructs, 1990.



## 第 5 章

# 洪水制御支援のための降雨・流量観測システムの設計

### 5.1 概説

前章までは、流域-人間系を構成する要素の中でも特に洪水の制御に携わる人間のモデル化および意思決定の支援を行うシステムの開発を進めてきた。もちろん、いかなる手法で意思決定及びその支援を行うにせよ、洪水制御における意思決定の基本となる材料が洪水現象の観測データであることはいうまでもない。特に、洪水時の意思決定のための基礎情報として降雨・流量の観測データをみると、洪水現象の現況把握のための情報として重要であることはもちろん、これら観測データをもとにしたリアルタイムの降雨予測・流出予測を通じて意思決定の情報となる点で重要であることがわかる。したがって、限られた数の観測所からなる観測網から得られる情報を最大限に活用するためには、降雨観測所や流量観測所をどこに設けるべきか、その数はどの程度必要なのか、観測の時間間隔はどうあるべきかといった問題を解決する必要がある。

降雨観測所の配置や流量観測所の配置に関する研究は数多く行われている。もちろん、降雨・流量観測ネットワークの設計には、そこから得られるデータをいかなる目的に用いるかによって、アプローチの立場も異なってくる。従来の研究の立場は、降雨観測所がまばらにしか配置できないことから、面積雨量の推定や降雨の空間分布の推定に重点をおく立場が中心であった（この場合、設計対象は降雨観測所に限られる）。石原 池淵[1]は、降雨観測における問題として、観測期間の長短、観測値の欠測・不良、観測位置がまばらであることをとりあげ、これらの問題に対処し、降水資料を補足・拡充するための方法として、降水の地域相関分析と基幹観測所を中心とする等相関係数線図をもとにした降雨観測所の配置基準を提案している。さらに、Rodriguez-Iturbe and Mejia [2]は、年、季、月単位といった長期の空間平均降雨の推定に着目し、無作為抽出法、層別無作為抽出法を用いて降雨観測所の数および観測時間間隔を決定する方法を示している。また、高棹・池淵[3]は、日単位以上の降水量を対象とし、降水の観測効果を情報量で表す新しい方法を提案すると同時に、観測所の継続・廃止・新設にかかる費用をも考慮にいれた観測網最適配置計画の基本フレームを示している。

一方、近年、流出予測理論の発展とともに、降雨観測データは、実時間降雨予測のための基本的な資料として、また、流量観測データとともに洪水の実時間予測のための基本情報として用いら

れることが多くなってきている。したがって、降雨・流量観測値を流出予測を通じて洪水制御に利用するという立場に立てば、観測ネットワークの設計基準として流量予測の精度を用いることが考えられる。この場合、降雨観測所のための配置を考えるだけでは不十分であり、降雨観測所と流量観測所を同時に扱う必要がある。降雨・流量観測ネットワークを流出予測の精度を基準として設計しようとする試みは、Tarboton ら [4] に始まる。Tarboton らは、降雨が時・空間に分離可能で定常な共分散構造を持つものとして、降雨・流量変換の線形性を仮定し、流量の最小分散線形推定を行い、その誤差分散を基準として、流域内に設けるべき降雨観測所・流量観測所の数及び観測時間間隔を決定する方法を提案した。また、Bras ら [5] はこの方法を降雨分布が定常でない場合に拡張して議論している。

降雨や流量の観測が実時間流出予測の基礎情報として果たす役割は、今後、ますます重要となってくると考えられる。特に、レーダー雨量計など降雨の空間分布を面的にとらえる手段が手に入った今、地上雨量計による降雨観測が果たす役割としては、レーダー雨量の補正 [6] や実時間流出予測に用いるデータといった比重が高い。したがって、流出予測の精度を基準として降雨・流量の観測システムを設計する方法を確立することは、洪水制御のための情報としてデータを利用する上で重要な課題である。もちろん、この方向で、降雨観測所・流量観測所を同時に設計する手法として、上に述べた Tarboton ら [4] および Bras ら [5] の試みがあるが、両者とも、分布型の流出モデルに対応していないこと、流量観測所を流域下流端だけでなく流域内部に設けた場合の効果を算定できるものではないこと、雨量観測所間あるいは雨量観測所と流量観測所との間の相対的な位置関係を与えるものでないこと等の問題がある。流出予測の精度を観測システムの評価指標とする場合には、降雨観測所と流量観測所の数だけでなく、これら相互の位置関係が予測精度に大きな影響を与えることが予想される。特に、実際の観測システムの設計の際には、雨量や流量観測所の数は費用面の制約から決定されることも予想され、この場合には、これら観測所の空間的な配置こそが問題となろう。本章では、特にこの点に留意し、降雨・流量観測システムの設計に際し、設計の基準を流量予測の精度とし、流域内に設けるべき降雨観測所と流量観測所の数、空間的な配置、観測時間間隔を決定する方法を提案する。

## 5.2 流出予測の精度を基準とした降雨・流量観測システムの設計問題

本研究の目的は、流域下流端での流量予測精度を評価指標として、降雨・流量観測システムを設計することにある。具体的には、流域内に設けるべき降雨観測所の数  $I$  とその位置  $x_i (i = 1, \dots, I)$  および降雨観測時間間隔  $\Delta t_r$ 、流量観測所の数  $M$  と位置  $y_m (m = 0, \dots, M)$ 、ただし  $0$  は流域下流端を  $1 \sim M$  は流域内部を表す) および流量の観測時間間隔  $\Delta t_q$  を決定する問題を考えることになる (図 5.1 参照)。したがって、以上の項目が、流量予測の精度 (予測誤差分散) にいかなる効果を及ぼすかを定量的に把握しなければならない。

本研究では、降雨観測所・流量観測所の数及び配置と観測時間間隔が流域下流端流量の予測誤差の分散に与える影響を導くため、次の仮定をおく。

1. 時刻  $t$ 、地点  $x$  における降雨強度を  $\zeta(t, x)$  とする時、 $\zeta(t, x) = 0, t < 0, x \in A$  ( $A$  は流域を表す)

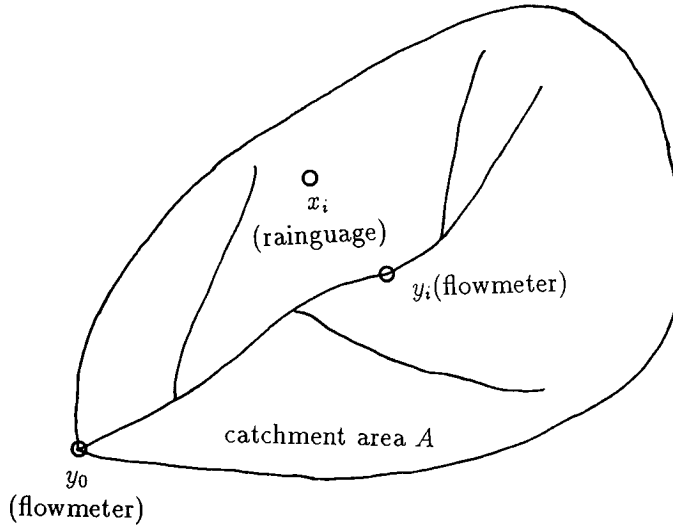


図 5.1: 降雨 流量観測システム

2. 時刻  $t > 0$  での降雨強度の期待値  $E[\zeta(t, x)]$ , 共分散  $\text{Cov}[\zeta(t_1, x_1), \zeta(t_2, x_2)]$  は既知である. すなわち, 降雨や流量の観測値を得る以前に降雨強度の期待値と共分散を与える先驗分布がある.
3. 降雨は時間間隔  $\Delta t_r$  で観測され, 時刻  $k \cdot \Delta t_r$ , 観測地点  $x_i$  の観測値  $z_i(k \cdot \Delta t_r)$ , ( $k = 0, 1, \dots$ ) は次式で得られる.

$$z_i(k \cdot \Delta t_r) = \int_{(k-1) \cdot \Delta t_r}^{k \cdot \Delta t_r} \zeta(t, x) dt \quad (5.1)$$

4. 時刻  $t$ , 地点  $y_m$  での流量  $q_m(t)$  は, 既知関数  $h_m(t, x)$  ( $t < 0$  で  $h_m(t, x) = 0$ ) を用いて,

$$q_m(t) = \int_{-\infty}^t d\tau \int_A dx \zeta(\tau, x) \cdot h_m(t - \tau, x) \quad (5.2)$$

で与えられる. もちろん, 実際の流出現象は線形とはいえないから, ここでの議論は何等かの線形化手法を用いた近似を前提にしたものである. 線形化したことにより, 全ての時刻における流域下流端流量の推定誤差分散をオフラインで計算できることになり, 設計問題の取扱に適した形になる. 非線形の式を用いると, 流域下流端流量の推定誤差分散をオフラインで計算することは不可能であり, 観測値の実現系列が必要となる. この場合, 観測値の実現系列ごとに異なる推定誤差分散が得られることになり, システムを事前に設計するには不適当である.

5. 流量は時間間隔  $\Delta t_q$  で観測され, 流量観測値  $q_m(l \cdot \Delta t_q)$ , ( $l = 0, 1, \dots$ ) は(5.2)式で与えられる.

上記 3 および 5 に示す形式で降雨強度  $\zeta(t, x)$  を観測していると考えると, 確率ベクトル場の Kalman Filter 理論を用いて観測値が得られたときの降雨強度の推定値と推定誤差分散を導くことができる. この方法については, 5.3で述べることにする.

### 5.3 降雨・流量観測が流出予測精度に及ぼす効果の算定

本節では、確率ベクトル場のカルマンフィルタ理論を用いて、5.2で設定した仮定のもとで、降雨・流量観測が流域下流端流量の予測精度に及ぼす効果を算定するための諸式を導く。なお、本章の理論展開の基礎となる確率ベクトル場のカルマンフィルタ理論を線形最小二乗推定の立場から導いたものを付録Aに示しておくので随時参照されたい。

#### 5.3.1 降雨観測が流出予測の精度に与える影響

ここでは、(5.1)式で与えられる降雨観測値が得られたときに、観測値を用いて流域下流端流量を予測し、その予測誤差分散を求める方法を導く。

まず、時刻  $t_0$  に、 $I$  個の降雨観測所から得られる降雨観測値を  $I$  次元確率ベクトル  $\mathbf{z}(t_0)$  で表す。すなわち、

$$\mathbf{z}(t_0) = (z_1(t_0) \ z_2(t_0) \ \dots \ z_I(t_0))^t \quad (5.3)$$

である。 $z_i(t_0)$  は、地点  $x_i$  に位置する降雨観測所における時刻  $t_0$  の観測値であり、(5.1)式で与えられる。いま、時刻  $t_0$  において(5.3)式の形の観測値  $\mathbf{z}(t_0)$  を得、 $\mathbf{z}(t_0)$  を用いた降雨強度  $\zeta(t, x)$  の線形最小二乗推定値  $\hat{\zeta}(t, x | \mathbf{z}(t_0))$  と推定誤差の共分散関数、

$$R(t_1, x_1, t_2, x_2 | \mathbf{z}(t_0)) = E_{\zeta, \mathbf{z}}[\{\zeta(t_1, x_1) - \hat{\zeta}(t_1, x_1 | \mathbf{z}(t_0))\} \{\zeta(t_2, x_2) - \hat{\zeta}(t_2, x_2 | \mathbf{z}(t_0))\}] \quad (5.4)$$

が求められているとする。時間が進んで、時刻  $t_0 + \Delta t_r$  に新たな降雨観測値  $\mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r)$  が得られたとき、 $\mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r)$  を用いて降雨強度の推定値  $\hat{\zeta}(t, x | \mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r))$  と推定誤差の共分散関数  $R(t_1, x_1, t_2, x_2 | \mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r))$  を求めたい。

この問題は、状態量が確率場  $\zeta(t, x)$  で観測方程式が(5.1)なる線形の式であるから、付録Aの系1.6'において、 $\mathbf{x}(\omega)$  が  $\zeta(t, x)$ 、 $\mathbf{y}^s \mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r)$ 、 $\mathbf{Y}^s \mathbf{z}(t_0)$ 、 $\mathbf{h}(s_0)$  が  $I$  次列ベクトル  $\mathbf{h} = (1 \ 1 \ \dots \ 1)^t$  である場合に対応する。したがって、降雨強度の推定値  $\hat{\zeta}(t, x | \mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r))$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \hat{\zeta}(t, x | \mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r)) = & \hat{\zeta}(t, x | \mathbf{z}(t_0)) + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} R(t, x, \tau, x_0 | \mathbf{z}(t_0)) \mathbf{h}^t d\tau \\ & \left[ \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} d\tau_1 \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} d\tau_2 \mathbf{h} R(\tau_1, x_0, \tau_2, x_0 | \mathbf{z}(t_0)) \mathbf{h}^t \right]^{-1} \\ & \{ \mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r) - \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} \mathbf{h} \hat{\zeta}(\tau, x_0 | \mathbf{z}(t_0)) d\tau \} \end{aligned} \quad (5.5)$$

ここに、 $x_0$  は降雨観測所の位置を表す。簡単のため、 $I$  次行ベクトル  $K(t, x)$  を、

$$K(t, x) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} R(t, x, \tau, x_0 | \mathbf{z}(t_0)) \mathbf{h}^t d\tau \left[ \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} d\tau_1 \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} d\tau_2 \mathbf{h} R(\tau_1, x_0, \tau_2, x_0 | \mathbf{z}(t_0)) \mathbf{h}^t \right]^{-1} \quad (5.6)$$

とおけば、(5.5)は、

$$\hat{\zeta}(t, x | \mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r)) = \hat{\zeta}(t, x | \mathbf{z}(t_0)) + K(t, x) \{ \mathbf{z}(t_0 + \Delta t_r) - \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} \mathbf{h} \hat{\zeta}(\tau, x_0 | \mathbf{z}(t_0)) d\tau \} \quad (5.7)$$

とかける。(5.7)式および(5.6)式を各ベクトルの成分を用いて表現すれば、

$$\hat{\zeta}(t, x | z(t_0 + \Delta t_r)) = \hat{\zeta}(t, x | z(t_0)) + \sum_{i=1}^I k_i(t, x) \{ z_i(t_0 + \Delta t_r) - \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} \hat{\zeta}(\tau, x_i | z(t_0)) d\tau \} \quad (5.8)$$

$$\sum_{j=1}^I k_j(t, x) \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} d\tau_1 \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} d\tau_2 R(\tau_1, x_i, \tau_2, x_j | z(t_0)) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_r} R(t, x, \tau, x_i | z(t_0)) d\tau \quad (5.9)$$

( $i = 1, \dots, I$ )

ただし、 $k_i(t, x)$  は行ベクトル  $K(t, x)$  の第  $i$  成分である。

また、推定誤差の共分散関数  $R(t_1, x_1, t_2, x_2 | z(t_0 + \Delta t_r))$  は、(5.6)式の  $K(t, x)$  を用いると、付録Aの系1.6'より次式で与えられる。

$$\begin{aligned} R(t_1, x_1, t_2, x_2 | z(t_0 + \Delta t_r)) &= R(t_1, x_1, t_2, x_2 | z(t_0)) - K(t_1, x_1) \int_{t_0}^{t_0 + k\Delta t_r} h R(\tau, x_0, t_2, x_2 | z(t_0)) d\tau \\ &= R(t_1, x_1, t_2, x_2 | z(t_0)) - \sum_{i=1}^I k_i(t_1, x_1) \int_{t_0}^{t_0 + k\Delta t_r} R(\tau, x_i, t_2, x_2 | z(t_0)) d\tau \end{aligned} \quad (5.10)$$

以上により、降雨観測値を得たときに、入手した降雨観測値を用いた降雨強度の推定値は(5.8)式で、推定誤差の共分散関数は(5.10)式で与えられる。降雨観測式(5.1)が線形であることから、式(5.10)で与えられる降雨強度推定誤差の共分散関数は観測値に依存していない。したがって、最初に、観測を行っていないときの降雨強度の分布、特にその共分散関数が与えられれば、(5.10)式を用いて観測時間毎の降雨強度の推定誤差の共分散関数を観測値の実現系列を用いることなく求めることができる。

なお、本研究では、流出モデルとして(5.2)式の線形応答関係を用いていることから、付録Aの系1.5'より流域下流端流量の推定値  $\hat{q}(t | z(t_0 + \Delta t_r))$  は、降雨強度の推定値  $\hat{\zeta}(t, x | z(t_0 + \Delta t_r))$  を(5.2)式に代入して求めればよい。また、流量の推定誤差の共分散関数  $Q(t_1, t_2 | z(t_0 + \Delta t_r))$  は、

$$Q(t_1, t_2 | z(t_0 + \Delta t_r)) = \int_A d\xi_1 \int_A d\xi_2 \int_{-\infty}^t d\tau_1 \int_{-\infty}^t d\tau_2 h_0(t_1 - \tau_1, \xi_1) R(\tau_1, \xi_1, \tau_2, \xi_2 | z(t_0 + \Delta t_r)) h_0(t_2 - \tau_2, \xi_2) \quad (5.11)$$

で与えられる。ただし、 $h_0(t, x)$  は(5.2)式で定義した応答関数である。

### 5.3.2 流量観測が流出予測の精度に与える影響

本節では、(5.2)式で与えられる流量観測値が得られたときに、観測値を用いて流域下流端流量を推定し、その予測誤差分散を求める方法を導く。まず、時刻  $t_0$  に、 $M$  個の流量観測所から得られる流量観測値  $q_m(t_0)$  ( $m = 1, \dots, M$ ) を列ベクトルの形に並べたものを  $q(t_0)$  とかく。 $q_m(t_0)$  は(5.2)式で与えられる。いま、時刻  $t_0$  において流量観測値  $q(t_0)$  を得、 $q(t_0)$  を用いた降雨強度  $\zeta(t, x)$  の線

形最小二乗推定値 $\hat{\zeta}(t, x | \mathbf{q}(t_0))$ と推定誤差の共分散関数 $R(t_1, x_1, t_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0))$ を得たとする。時間が進んで次の流量観測時刻 $t_0 + \Delta t_q$ に流量観測値 $\mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q)$ を入手したときの降雨強度の推定値 $\hat{\zeta}(t, x | \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q))$ と推定誤差の共分散関数 $R(t_1, x_1, t_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q))$ を求めたい

この問題は、降雨強度 $\zeta(t, x)$ を(5.2)式で観測していると考え、付録Aの系1.6'において、 $\mathbf{x}(\omega)$ が $\zeta(t, x)$ 、 $\mathbf{y}$ が $\mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q)$ 、 $\mathbf{Y}$ が $\mathbf{q}(t_0)$ 、 $\mathbf{h}(s_0)$ が $M$ 次列ベクトル $\mathbf{h}(t - \tau, x) = (h_1(t - \tau, x), \dots, h_M(t - \tau, x))^t$ である場合に対応する。したがって、推定値 $\hat{\zeta}(t, x | \mathbf{q}(t_0))$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \hat{\zeta}(t, x | \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q)) &= \hat{\zeta}(t, x | \mathbf{q}(t_0)) + \\ &\int_A d\xi \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau R(t, x, \tau, \xi | \mathbf{q}(t_0)) \mathbf{h}^t(t_0 + \Delta t_q - \tau, \xi) \\ &[ \int_A dx_1 \int_A dx_2 \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau_1 \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau_2 \mathbf{h}(t_0 + \Delta t_q - \tau, x_1) R(\tau_1, x_1, \tau_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0)) \mathbf{h}^t(t_0 + \Delta t_q - \tau, x_2) ]^{-1} \\ &\{ \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q) - \int_A d\xi \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau \mathbf{h}(t_0 + \Delta t_q - \tau, \xi) \hat{\zeta}(\tau, \xi | \mathbf{q}(t_0)) \} \end{aligned} \quad (5.12)$$

これを、 $M$ 次行ベクトル $K'(t, x)$ を用いて、

$$\begin{aligned} \hat{\zeta}(t, x | \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q)) &= \\ \hat{\zeta}(t, x | \mathbf{q}(t_0)) &+ K'(t, x) \{ \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q) - \int_A d\xi \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau \mathbf{h}(t_0 + \Delta t_q - \tau, \xi) \hat{\zeta}(\tau, \xi | \mathbf{q}(t_0)) \} \end{aligned} \quad (5.13)$$

とかく。ただし、

$$\begin{aligned} K'(t, x) &= \\ &\int_A d\xi \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau R(t, x, \tau, \xi | \mathbf{q}(t_0)) \mathbf{h}^t(t_0 + \Delta t_q - \tau, \xi) \\ &[ \int_A dx_1 \int_A dx_2 \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau_1 \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau_2 \mathbf{h}(t_0 + \Delta t_q - \tau, x_1) \\ &R(\tau_1, x_1, \tau_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0)) \mathbf{h}^t(t_0 + \Delta t_q - \tau, x_2) ]^{-1} \end{aligned} \quad (5.14)$$

である。さらに、推定誤差の共分散関数 $R(t_1, x_1, t_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q))$ は、

$$\begin{aligned} R(t_1, x_1, t_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q)) &= \\ R(t_1, x_1, t_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0)) &- K'(t_1, x_1) \int_A d\xi \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau \mathbf{h}(t_0 + \Delta t_q - \tau) R(\tau, \xi, t_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0)) \end{aligned} \quad (5.15)$$

で与えられる。

(5.13), (5.14), (5.15) 式をそれぞれ各ベクトルの成分を用いて具体的に書くとそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} \hat{\zeta}(t, x | \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q)) &= \\ \hat{\zeta}(t, x | \mathbf{q}(t_0)) &+ \sum_{m=1}^M k'_m(t, x) \{ q_m(t_0 + \Delta t_q) - \int_{A_m} d\xi \int_{-\infty}^{t_0 + \Delta t_q} d\tau h_m(t_0 + \Delta t_q - \tau, \xi) \hat{\zeta}(\tau, \xi | \mathbf{q}(t_0)) \} \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^M k'_n(t, x) \int_{A_m} dx_1 \int_{A_n} dx_2 \int_{-\infty}^{t_0+\Delta t_q} d\tau_1 \int_{-\infty}^{t_0+\Delta t_q} d\tau_2 \\
& \quad h_m(t_0 + \Delta t_q - \tau, x_1) R(\tau_1, x_1, \tau_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0)) h_n(t_0 + \Delta t_q - \tau, x_2) \\
& = \int_{A_m} d\xi \int_{-\infty}^{t_0+\Delta t_q} d\tau R(t, x, \tau, \xi | \mathbf{q}(t_0)) h_m(t_0 + \Delta t_q - \tau, \xi) \\
& \quad (m = 1, \dots, M)
\end{aligned} \tag{5.17}$$

$$\begin{aligned}
R(t_1, x_1, t_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q)) = \\
R(t_1, x_1, t_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0)) - \sum_{m=1}^M k'_m(t_1, x_1) \int_{A_m} d\xi \int_{-\infty}^{t_0+\Delta t_q} d\tau h_m(t_0 + \Delta t_q - \tau) R(\tau, \xi, t_2, x_2 | \mathbf{q}(t_0))
\end{aligned} \tag{5.18}$$

以上により、新たな流量観測値を得たときに、入手した観測値を用いた降雨強度の推定値は(5.16)式で、推定誤差の共分散関数は(5.18)式で与えられる。流出モデルとして線形の(5.2)式を与えたことから、式(5.18)で与えられる降雨強度推定誤差の共分散関数は観測値に依存していない。したがって、最初に、観測を行っていないときの降雨強度の分布、特にその共分散関数が与えられれば、5.3で導いた降雨観測値を得た場合と同様に(5.18)式を用いて観測時間毎の降雨強度の推定誤差の共分散関数を観測値の実現系列を用いることなく求めることができる。なお、流量の推定誤差の共分散関数 $Q(t_1, t_2 | \mathbf{q}(t_0 + \Delta t_q))$ は、(5.11)式を用いて計算できる。

## 5.4 適用と考察

### 5.4.1 適用流域モデル

本節では、5.2、5.3に示した理論展開の有効性の確認と問題点の抽出のため、モデル流域での降雨観測所の位置に重点をおいて適用を行う。特に、流域の流出の速さおよび雨量計の位置と降雨予測精度との関係を考察するため、図5.2に示すような1次元流域モデルを考え、この流域に1個の雨量観測所を設け、その観測値をもとにして流域下流端流量を予測する場合を考える。図5.2中 $L$ は流域長、 $B$ は流域幅、 $\xi$ は流域下流端から雨量観測所までの距離を表す。ただし、流域幅 $B$ は十分小さいものとする。なお、本研究では $L = 10\text{km}$ とした。

また、流出速度 $v$ (一定とする)と雨量計の適切な位置との関係を検討するため、流出モデルとして流域下流端での時刻 $t$ における流量 $q_0(t)$ を

$$q_0(t) = B \int_0^L \int_{-\infty}^t \zeta(\tau, x) \delta(t - \frac{x}{v} - \tau) d\tau dx \tag{5.19}$$

で与える。ただし、 $\delta(\cdot)$ はDiracのデルタ関数である。

### 5.4.2 降雨強度分布の先験的モデル

本研究で提案する降雨・流量観測システムの設計法は、5.2でも述べたとおり、降雨や流量の観測値を得る以前に降雨強度の期待値と共分散を与える形式の先験分布があることが必要である。そこで、本適用例では、観測が無い場合の先験的な降雨分布モデルとして、Rodriguez-Iturbe and

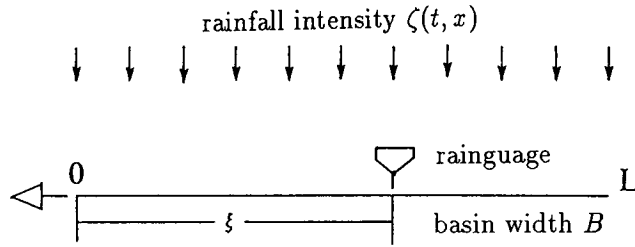


図 5.2: 適用流域モデルの概要

Eagleson のモデル [7] を採用する。本モデルは、降雨を、時間的・空間的にランダムに生じかつその時・空間的な生起確率を表すパラメータを持つ多数の降雨セルの集まりによって構成されるものとしてモデル化したものであり、時刻  $t$ 、地点  $x$  における降雨強度  $\zeta(t, x)$  の平均値および共分散は次式で与えられている。

$$E[\zeta(t, x)] = \frac{E\{i_0\} \lambda \beta 2\pi D^2}{\alpha - \beta} \{\exp(-\beta t) - \exp(-\alpha t)\} \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\zeta(t_1, x_1), \zeta(t_2, x_2)] = & \\ & \frac{\lambda \beta E\{i_0^2\} \pi D^2}{2\alpha - \beta} \exp(-\alpha t_1) \{\exp((\alpha - \beta)t_2) - \exp(-\alpha t_2)\} \exp\left(\frac{-d^2}{4D^2}\right) \end{aligned} \quad (5.21)$$

$$d = \|x_1 - x_2\|$$

ただし、 $i_0$  は降雨セルが生じた瞬間のセル中心における降雨強度を表す確率変数であり、 $E\{i_0\}$  は降雨事象全体で変化しない。 $i_0$  は指数分布にしたがうものとする。このとき、 $E\{i_0\} = 2E^2\{i_0\}$  が成立する。また、 $\beta$  はセルの数の減少の度合を表すパラメータであり、 $\alpha$  は降雨強度の時間的な減少の度合を表すパラメータである。 $D$  はセルの空間的な広がりを表すパラメータであり、 $\lambda$  は空間的なセルの数の平均値である。なお、各パラメータの値は Rodoriguez-Iturbe and Eagleson [7] が仮定した値

$$\begin{aligned} E\{i_0\} &= 1.00 \text{ mm/min} \\ \beta &= 6.6 \times 10^{-3} \text{ cells/min} \\ 2\pi D^2 &= 30 \text{ km}^2 \\ \alpha &= 0.025 / \text{min} \\ \lambda &= 0.016 \text{ cells/km}^2 \\ E\{i_0^2\} &= 2E^2\{i_0\} = 2.00 \text{ mm}^2/\text{min}^2 \end{aligned}$$

を用いることにする。また、降雨強度の分散は (5.21) 式で  $t_1 = t_2 = t$ 、 $x_1 = x_2 = x$  とおくことにより

$$\text{Var}[\zeta(t, x)] = \frac{\lambda \beta E\{i_0^2\} \pi D^2}{2\alpha - \beta} \exp(\alpha t) \{\exp((\alpha - \beta)t) - \exp(-\alpha t)\} \exp\left(\frac{-d^2}{4D^2}\right) \quad (5.22)$$



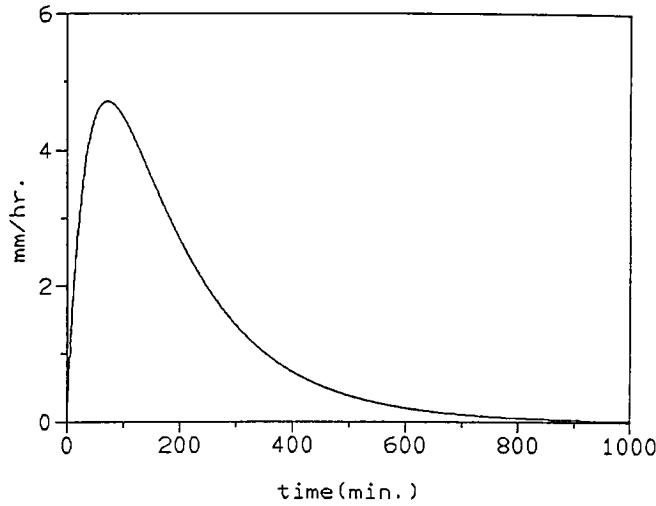


図 5.3: 観測の効果を考えない場合の降雨強度の平均

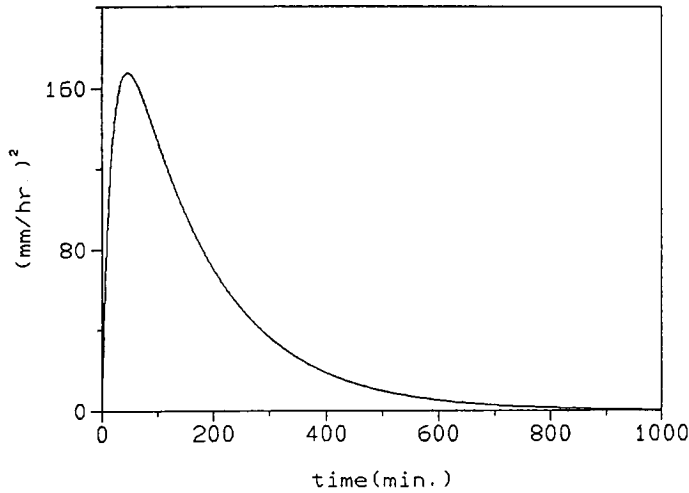


図 5.4: 観測の効果を考えない場合の降雨強度の分散

で与えられる。(5.20), (5.22)式で与えられる降雨強度の平均値と分散の時間的推移を図 5.3, 図 5.4 に示す。さらに, (5.20), (5.22) 式から降雨の平均値が最大になる時刻  $t^*$ , 分散が最大になる時刻  $t^{**}$  は

$$t^* = \frac{1}{\alpha - \beta} \ln\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \quad (5.23)$$

$$t^{**} = \frac{1}{2\alpha - \beta} \ln\left(\frac{2\alpha}{\beta}\right) \quad (5.24)$$

で与えられる。パラメータとして前述の値を用いると  $t^* = 72.38(\text{min})$ ,  $t^{**} = 46.66(\text{min})$  となる。以上のモデルを, 観測の効果を考えない場合での降雨強度の分布の先験的モデルとして採用すれば, 観測値が得られていない時点での流域下流端における流量の推定値  $E[q_0(t)]$  と分散  $\text{Var}[q_0(t)]$  は

(5.2)式および(5.11)式より,

$$\begin{aligned} E[q_0(t)] &= B \int_0^L \int_{-\infty}^t E[\zeta(\tau, x)] \delta(t - \frac{x}{v} - \tau) d\tau dx \\ &= B \int_0^L E[\zeta(t - \frac{x}{v}, x)] dx \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$Var[q_0(t)] = B^2 \int_0^L dx_1 \int_0^L dx_2 Cov[\zeta(t - \frac{x_1}{v}, x_1), \zeta(t - \frac{x_2}{v}, x_2)] \quad (5.26)$$

で与えられる. また, 流量の平均値が最大になる時刻  $t_q^*$  は

$$t_q^* = \frac{1}{\alpha - \beta} \ln \frac{\exp(\alpha L/v) - 1}{\exp(\beta L/v) - 1} \quad (5.27)$$

で与えられる. (5.25)式で与えられる流量の平均値の時間的推移を流出速度  $v = 3.33m/s, 1.67m/s, 0.833m/s, 0.556m/s$  の4ケースについてそれぞれプロットしたものを図5.5に示す. また, (5.26)式で与えられる流域下流端流量の分散を同じく4ケースの流出速度に対してそれぞれプロットしたものを図5.6に示す. ただし, (5.26)式の積分には台形公式を用いた. 数値積分の幅  $\Delta x, \Delta t$  は,  $v = 3.33m/s$  のときは  $\Delta x = 1.0km, \Delta t = 5.0min$  とし,  $v = 1.67m/s, 0.833m/s, 0.556m/s$  のときは  $\Delta x = 0.5km, \Delta t = 5.0min$  とした. 図5.6によれば, 流量の分散の最大値は流出速度  $v$  が小さくなるにしたがって小さくなっているが, これは, 流出速度が大きい時は分散が大きい時刻の降雨が流出の大部分をしめるのに比べ, 流出速度が小さいときは降雨の分散が平均化されて流量の分散になるためと考えられる.

#### 5.4.3 降雨観測のみを行った場合の最適観測所位置

ここでは, 流量予測精度を評価指標とした場合に, 降雨観測所を流域内に一様に配置するという方針でよいかどうかを明らかにするため, 図5.2に示すモデル流域に降雨観測所を1箇所設けるものとして, 最適な観測位置を決定する. この場合, もし, 降雨観測所を流域内に一様に配置すべきなのであれば, 流域の中央がよいということになる.

いま, 降雨観測所を流域下流端から距離  $\xi$  の位置に設けるものとする. この観測所から, 時間間隔  $\Delta t_r$  ごとに降雨観測値  $z_1(k \cdot \Delta t_r)$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) が得られる. また, 観測値を得る以前の降雨強度の推定値と推定誤差の共分散はそれぞれ(5.20)式, (5.21)式で, 流域下流端流量の推定値と推定誤差の共分散はそれぞれ(5.25)式, (5.26)式で与えられるとする. このとき, 降雨観測値を得たときの降雨強度の推定値  $\hat{\zeta}(t, x | z_1(k \cdot \Delta t_r))$  及び推定誤差の共分散関数  $R(t_1, x_1, t_2, x_2 | z_1(k \cdot \Delta t_r))$  は, 5.3.1の(5.8), (5.9), (5.10)式から,

$$\hat{\zeta}(t, x | z_1(k \Delta t_r)) = \hat{\zeta}(t, x | z_1((k-1) \Delta t_r)) + k_1(t, x) \int_{(k-1) \Delta t_r}^{k \Delta t_r} \hat{\zeta}(\tau, \xi) d\tau \quad (5.28)$$

$$k_1(t, x) = \frac{\int_{(k-1) \Delta t_r}^{k \Delta t_r} R(t, x, \tau, \xi) d\tau}{\int_{(k-1) \Delta t_r}^{k \Delta t_r} d\tau_1 \int_{(k-1) \Delta t_r}^{k \Delta t_r} d\tau_2 R(\tau_1, \xi, \tau_2, \xi | z_1((k-1) \Delta t_r))} \quad (5.29)$$

$$R(\tau_1, \xi, \tau_2, \xi | z_1(k \Delta t_r)) = R(\tau_1, \xi, \tau_2, \xi | z_1((k-1) \Delta t_r)) - k_1(t_1, x_1) \int_{(k-1) \Delta t_r}^{k \Delta t_r} R(\tau, \xi, t_2, x_2) d\tau \quad (5.30)$$

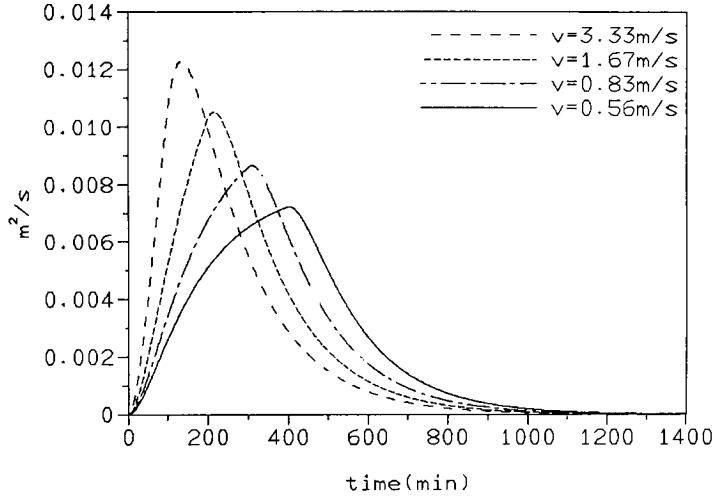


図 5.5: 観測の効果を考えない場合の流量の推定値

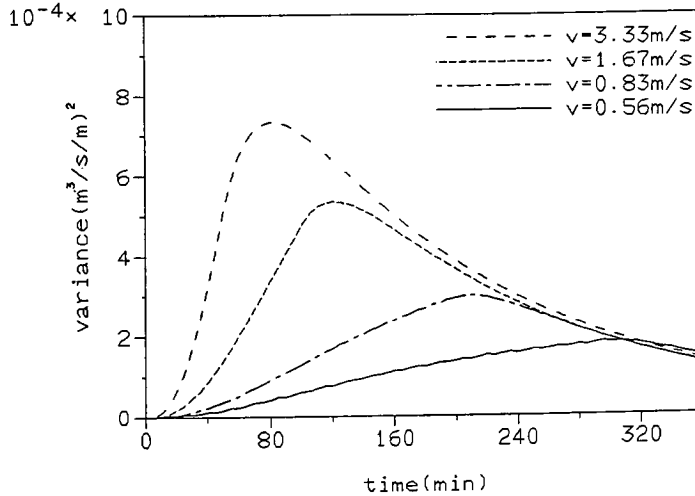


図 5.6: 観測の効果を考えない場合の流量推定値の分散

で与えられる。また、流域下流端での単位幅当りの流量の推定値  $\hat{q}_0(t|k \cdot \Delta t_r)/B$  は(5.25)式より、

$$\frac{\hat{q}_0(t|z_1(k \cdot \Delta t_r))}{B} = \int_0^L \hat{\zeta}(t - \frac{x}{v}) dx \quad (5.31)$$

となり、流量の推定誤差の分散は、(5.26)式より、

$$\frac{Cov[q_0(t|z_1(k \cdot \Delta t_r))]}{B^2} = \int_0^L dx_1 \int_0^L dx_2 R(t - \frac{x_1}{v}, x_1, t - \frac{x_2}{v}, x_2 | z_1(k \Delta t_r)) \quad (5.32)$$

で表される。

さて、実際に降雨観測システムを評価する指標としては、上式の  $q_0(t|z_1(k \cdot \Delta t_r))$  を用いるにしても種々定義できるが、ここでは、ピーク流量の予測が洪水制御の上で特に重要であることを考慮し、ピーク流量の予測精度を用いることにする。ただし、ピーク流量の生起時刻を予測するためには、ハイドログラフ全体の予測を行うことが必要である [8] から、ここでは、観測の効果を考えな

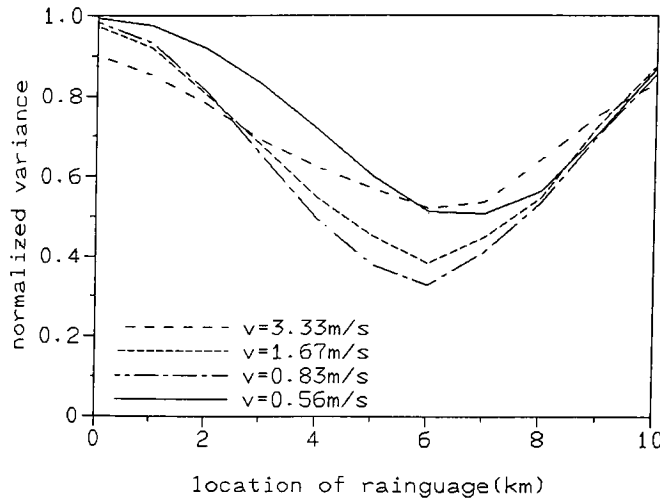


図 5.7: 流出速度と雨量計の最適位置

い場合における流域下流端流量の推定値（(5.25)式）が最大になる時刻 $t_q^*$ （(5.27)式で与えられる）をピーク流量生起時刻と仮定し，時刻 $t_q^*$ の流域下流端流量の予測誤差分散を用いることにする．具体的な手順を次に示す．

1. 観測を行わない場合について，流域下流端流量の平均値のピーク生起時刻 $t_q^*$ と時刻 $t_q^*$ での流量の分散 $Q_0(t_q^*)$ を求める．
2. 雨量観測を行った場合について，時刻 $t_q^*$ の流域下流端流量をリード時間 $t_L (= 2/3t_q^*)$ で，すなわち時刻 $t_q^* - t_L$ に予測し，予測誤差分散 $Q(t_q^* | t_q^* - t_L)$ を求める．
3.  $Q(t_q^* | t_q^* - t_L) / Q_0(t_q^*)$ を最小化する．

以上の手順で図 5.2 に示す流域において流出速度 $v = 3.33\text{m/s}$ ， $1.67\text{m/s}$ ， $0.833\text{m/s}$ ， $0.556\text{m/s}$ について流域下流端より 1km ごとに雨量計を配置して $Q(t_q^* | t_q^* - t_L) / Q_0(t_q^*)$ を計算し，雨量計の各位置に対してプロットしたものを図 5.7 に示す．図 5.7 をみると $Q(t_q^* | t_q^* - t_L) / Q_0(t_q^*)$ の値は，流出速度が $v = 3.33\text{m/s}$ ， $1.67\text{m/s}$ ， $0.833\text{m/s}$ のときは雨量計を流域下流端から 6km の地点に置いたときに最小となり， $v = 0.556\text{m/s}$ のときは 7km の地点に置いたときに最小となっており， $Q(t_q^* | t_q^* - t_L) / Q_0(t_q^*)$ が最小となる地点は流出速度が小さくなるにつれて上流側に移動する傾向があることがわかる．

この理由を考えるため，時刻 $t_q^*$ の流域下流端流量を形成する降雨の時刻と位置との関係を $v \cdot t_q^* > L$ の場合についてプロットしたものを図 5.8 に示す．図 5.8 中両者の関係は AC で示され， $x(t_q^* - t_L)$ はピーク流量を形成する雨が時刻 $t_q^* - t_L$ に降った位置を表す．時刻 $t_q^*$ の流域下流端流量を形成する降雨のうち予測を行う時刻 $t_q^* - t_L$ までに降る雨の時刻と位置の関係は BC で表される．したがって，降雨の時間的な相関が弱ければ区間 BC で表される降雨を精度良く推定することがピーク流量の予測精度を上げることにつながるため，BC に対応する流域上の区間 $(x(t_q^* - t_L) \sim L)$ の中間点付近に雨量計を設けるのが適当であると考えられる．この中間点は流出速度 $v$ が小さくなるにつれ上流に移動するから，それに伴い最適な雨量計の位置も上流側に移動する．本適用例では最適な雨量計位置は $x(t_q^* - t_L)$ から $L$ の区間の中間点よりは下流側にずれる結果となっているが，これは降雨強度

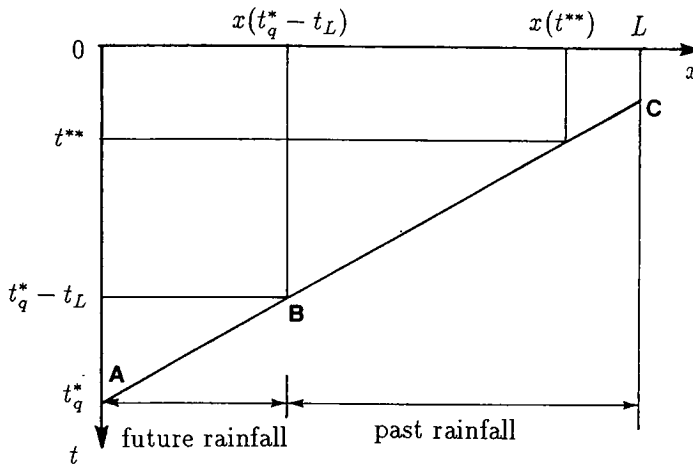


図 5.8: ピークを形成する降雨の時空間分布

に時間的な相関があるためであると考えられる。また、降雨強度の分散が最大になる時刻  $t^{**}$  が降雨初期に訪れるため、時刻  $t^{**}$  の降雨のうちピーク形成に寄与する地点  $t^{**}$  付近の降雨推定精度を上げることもピーク予測精度の向上に必要であり、このことも流域上流側に雨量計を配置するという効果を与えていると考えられる。

なお、 $Q(t_q^* - t_L)/Q_0(t_q^*)$  の値の最小値は流出速度  $v$  が  $3.33\text{m/s}$ ,  $1.67\text{m/s}$ ,  $0.833\text{m/s}$  となるにしたがって減少し、 $v = 0.556\text{m/s}$  で再び上昇している。これは、流出速度が小さくなるにしたがって  $Q(t_q^* | t_q^* - t_L)$  の値は減少するが、同時に  $Q_0(t_q^*)$  の値も減少するため (図 5.6 参照)、この  $Q(t_q^* - t_L)$  と  $Q_0(t_q^*)$  の減少の度合の差によってこのような変化が生じると考えられる。

以上の適用結果から、流出予測の精度向上を考える場合には、雨量計を必ずしも流域内に一様に配置すべきではないこと、また、望ましい雨量計の位置は各流域の流出特性に大きく依存することがわかった。なお、今回の適用例では、流出速度を降雨継続期間を通じて一定と仮定しているが、実際には降雨特性にも影響を受けつつ変化する。したがって、実流域への適用にあたっては、本手法で観測所の候補値を絞った後、非線形流出モデルを採用し過去の観測データを用いたシミュレーションを行って最終的な観測ネットワークを決定するなど段階的な方法を考慮する必要がある。

## 5.5 結語

本章では、降雨・流量観測システムの設計に関し、降雨観測所・流量観測所の設置位置、観測時間間隔をどのようにとるかという問題を流域下流端での流量予測精度、特にピーク流量の予測精度を評価基準として設計する方法を展開した。得られた成果としては、

1. 降雨・流量観測システムの設計を流域下流端での流量予測精度を基準として行うため、流域内に設ける降雨観測所と流量観測所の数、空間的な配置および観測時間間隔が流域下流端流量の推定精度に及ぼす影響を算定する方法を確率ベクトル場のカルマンフィルタ理論を用いることによって導いた。本研究で提案した方法は、特に流域内に設ける降雨観測所の総数を

考慮するだけでなく、流域内部に設ける流量観測所の効果および降雨観測所と流量観測所の相対的な位置関係をも設計に組み入れることができるものである。

2. 適用における第一段階として1次元流域モデル上での降雨観測所の設置位置決定問題を扱い、雨量計の最も効果の高い設置位置は、常識的に考えられる流域の中心ではなく、流出の速度に応じて流域中央より上流に寄った位置であることを見いだした。これは、降雨観測所を流域内に一様に置けばよいとは限らないことを示している。

などが挙げられる。

また、今後の課題としては次のことが考えられる。

1. 流量観測についても適用を行い、流量観測所の位置、特に、流量観測所と降雨観測所の相対的な位置関係と流出予測精度の関係を解明する必要がある。
2. 実流域への適用を行い、本方法の有効性の確認と適用にあたっての問題点の抽出およびその解決を図らなければならない

## 参考文献

- [1] 石原藤次郎・池淵周一：降雨観測網の統計的評価，京都大学防災研究所年報，第13号B，pp. 33-51，1970.
- [2] Rodoriguez-Iturbe, I. and J. M. Mejia : The Design of Rainfall Networks in Time and Space, Water Resources Research, Vol. 10, No. 4, pp. 713-728, 1974.
- [3] 高棹琢馬・池淵周一：降水観測網がもたらす情報量とその観測網配置計画への応用，土木学会論文報告集，第234号，pp. 83-95, 1975.
- [4] Tarboton, D. G., R. L. Bras and C. E. Puente : Combined Hydrologic Sampling Criteria for Rainfall and Streamflow, Journal of Hydrology, No. 95, pp. 323-339, 1987.
- [5] Hydrologic Sampling — a Characterization in Terms of Rainfall and Basin Properties, Water Resources Research, Vol. 102, pp. 113-135, 1988.
- [6] 高棹琢馬・宝 馨・三谷裕次郎：洪水予測精度向上のためのレーダー雨量計の逐次補正について，第33回水理講演会論文集，pp. 103-108，1989.
- [7] Rodoriguez-Iturbe, I. and P. S. Eagleson : Mathematical Models of Rainstorm Events in Space and Time, Water Resources Research, Vol. 23, pp. 181-190, 1987.
- [8] 高棹琢馬・椎葉充晴・劉春燕・上林好之：降雨流出の実時間予測情報の形式について，水工学論文集，第34巻，pp. 79-84, 1990.

## 第 6 章

# 水害避難行動シミュレーションのためのミクロモデルの開発

### 6.1 概説

本章では、流域-人間系を構成する要素の内、洪水災害とその被害を受ける側の人間との関係を考え、洪水時の避難行動を住民の意識まで含めてシミュレーションできるモデルを開発する。

洪水災害を軽減する対策として、河道改修工事、洪水調節ダムの建設など治水施設の整備水準を高めるというハードな対策が重要であることはいうまでもない。実際、これらハードな対策に力が注がれた結果、我国の治水施設整備水準は大河川では第2次大戦後最大洪水に対して約6割、中小河川では50mm/hの洪水に対して都市区間で約5割というところまで来ている[1]。しかし、今後これらの整備水準をさらに上げていくためには、都市化の進行などによる用地確保の問題もあり、今まで以上の時間と費用が必要であることは想像に難くない。また、これら施設群の整備が上記目標水準に達したとしても、さらに、その水準を越える外力を受ける可能性が依然として残っている。したがって、水害軽減の施策として、水防活動や氾濫原管理あるいは避難活動といったソフトな対策も重要となってくる。すなわち、洪水災害の対策は、施設整備というハードな側面と水防あるいは避難といったソフトな側面との両面から考えて行かなければならない。特に、不幸にして氾濫が生起した場合を考えると、人命保護の上からも、避難活動を円滑に行えるような環境を整備しておくことが重要になる。

このような認識のもとに、水害や避難行動に対する意識の調査が行われる[2, 3, 4, 6, 5, 7]。一方、避難行動に影響を及ぼす洪水氾濫の状況や浸水位と避難行動の関係を分析するシミュレーションモデルの開発[9, 10, 11, 12]が行われている。ところで、これら水害避難行動のシミュレーションに関する研究は、いずれも、比較的広い領域を対象とし氾濫解析と関連づけることで、住民が避難を決定してから避難場所に至るまでの行動が浸水位によって受ける影響を再現することに重点がおかれている。したがって、避難する対象としての住民は、同じ情報にはまったく同じ行動をする均質な集団としてとらえられており、水害避難行動をマクロにとらえたものということができる。水害避難マクロモデルは浸水状況が避難に及ぼす影響の把握や指定避難場所の設定位置などを評価するのには適しているが、そこで再現される住民の行動は理想化されたものであり、住民個々の意識や水害経験の違い等は考慮できないという欠点を持つ。ところが、水害被災地における意識調査から



は、住民の水害意識や水害に対する関心の高さによって、避難行動に大きな差が生じるという事例が多々報告されている[3, 4, 6] したがって、より現実的なシミュレーションを行うためには、現地調査の結果明らかとなった住民の水害に対する意識や生活形態、避難場所や避難経路に関する知識、避難情報に対する反応の仕方をシミュレーションに直接反映できるモデルが必要である。もちろん、水害に対する意識や避難に関する知識、避難勧告等を受けた場合の行動は個々の住民の被災経験や生活形態によって大きく異なっているから、実状に即した避難行動シミュレーションには、水害時の個人レベルでの行動モデルが必要となる。

一方、人間の心理面も含めた行動をモデル化するには、プロダクションシステム<sup>1</sup>やファジィ推論<sup>2</sup>といった知識工学的手法が有効であろう。現在、これらの手法は、エキスパートシステムと呼ばれる意思決定支援システムを開発する際の知識表現あるいは利用手法として広く用いられているが、もともと人間の行う判断(推論)過程の一部をモデル化したものであり、人間の心理と行動の関係を記述するのに適していると考えられるからである。そこで、本研究では、これら知識工学的手法を用いて避難行動を規定する要因と行動との関係あるいは要因相互の関係を表現することを試みる。さらに、それを通じて、水害避難に関する現地調査の結果を計算機上での避難シミュレーションに反映し避難の制御方法を考察すべく、世帯レベルの水害避難行動を再現するマイクロモデルを設計する。

## 6.2 水害避難行動に関する過去の研究事例

水害時の住民の避難行動をシミュレートするモデルは、実際に水害避難の行われた事例に関する調査結果を反映できるものであることが望ましい。そこで、ここでは、水害避難行動に関する過去の調査事例について、避難行動のモデル化を念頭において概観する。加えて、過去提案された避難行動シミュレーション手法についても触れ、その適用性と問題点について整理する。

### 6.2.1 水害避難行動に関する調査研究

より安全で有効な水害避難システムを確立するためには、まず水害の実状や水害時における住民の行動特性を十分把握しておくことが重要である。このため、水害の被災地を対象としたアンケート調査が数多く行われている。これらのアンケート調査の結果を考察することにより、住民の水害時の避難行動に関する様々な特性が浮かび上がってくる。

道上[2]は山陰地方の水害常襲地帯の住民にアンケート調査を行い、避難の方法論について検討を加えている。調査の結果から、避難が円滑に行われるとかなり災害から身を守ることが可能であること、大災害時には日頃考えているような組織的な行動は取り難く、個々の人々の判断が重要になってくること、避難経路・場所を事前に知っている人は知らない人と比べて避難がはるかに順調に行われていることを指摘している。

<sup>1</sup>問題解決のための知識を IF-THEN 形式の書換規則によって表現しておき推論を行う方法[15]。知識を格納する部分を知識ベース、書換により推論を進める機構を推論エンジン。推論時にデータを扱う場所をデータベース(ワーキングメモリー)と呼ぶ。

<sup>2</sup>プロダクションシステムと同じく推論のための知識を IF-THEN 形式で表現するが、条件部・後件部の記述にファジィ集合を用いる方法。ただし、推論手順については、ファジィ関係の合成による方法の他に種々の簡易計算法が提案されている[16]。

今本ら[3]は、昭和57年7月に生じた長崎水害の調査を行っている。この調査は、それまで水害経験の少なかった長崎市と、昭和32年の水害で大きな被害をうけた諫早市での避難行動を比較したものである。これによると、過去の被害で水害意識が危険志向になっていた諫早市の避難行動が、日頃から水害の危険性に対する意識が低下している長崎市よりも迅速に行われていたこと、また、普段から水害ニュースへの関心の高かった諫早市の方が気象警報の入手率が高かったことも確かめており、水害意識や水害に対する関心の大きさの違いが避難行動に与える影響が大きいことを明らかにしている。また、長崎市での気象警報に対する無関心の理由として、7月に入っただけで4回も大雨洪水警報が出され住民が一種の警報慣れのような状態になっていたことを挙げ、水害・気象の情報が適切でないものが続く住民の意識が洪水を安全視する方向へと変わっていくことを指摘している。さらに、大雨洪水警報の16時50分という発令時期が、一日の勤務の終了直前に相当し、また一般家庭でも夕食準備などの家事に忙しい時期と重なったため気象情報が有効に作用しにくかったことを挙げ、時刻と生活形態により情報の入手状況やその効果が変わることも指摘している。ついで、長崎市の浸水災害地では避難命令を入手したにもかかわらず、避難の必要がないと考えたものが40%に上ることも指摘している。また、今本ら[3]は、昭和57年8月1日から8月3日の間に2度にわたる台風の襲来によって大和川流域で生じた水害についても調査を行っており、この結果、1回目の水害の経験が、住民の水害意識を高めたため、2回目の水害避難行動が1回目よりも迅速に行われたことも確かめている。

山田[5]は、昭和51年9月の水害時の岐阜県安八町地区における個々の住民の対応を聞き取り調査よりまとめ、集落別に避難行動と避難条件の関係をまとめている。特にその中で、避難行動を浸水時刻と避難時刻から早期型、同時型、状況判断型の3種類の型に分類し、集落別の型の違いとその原因について考察している。

吉本ら[6]は、熊本県御船川昭和63年5月洪水における避難行動についてアンケート調査を行い、避難の有無に関して数量化理論Ⅱ類による分析を行っている。その結果、避難の有無に対する影響を持つ因子として、居住年数、家屋の構造、浸水深、浸水時間、避難命令の有無の5つを抽出するとともに、浸水深・避難命令・家屋構造と避難率の関係を表す評価関数を求めている。また、吉本ら[7]は、六角川平成2年7月洪水における避難行動についても同様な調査を行い、数量化理論Ⅱ類による分析を行っている。さらに、吉本[8]らは、両調査結果を比較検討することにより流域・氾濫特性の違いによって避難行動特性が異なることを明らかにしている。特に、避難の有無に影響を与える因子として家屋構造・浸水深は両者に共通であるものの、浸水時間・避難命令についてはその影響が大きく異なることが指摘されている。

以上の研究から、住民の水害意識や水害行動は、過去の水害経験の有無やその内容あるいは新たな水害経験によりかわってくることを、ある程度危険な状態になっても避難命令・隣人の勧誘のような「きっかけ」になる要因がないと避難を決意しない住民もあれば、外部状況などによって自主的に避難を決意する住民もあることなどがわかる。

### 6.2.2 避難シミュレーションに関する研究

水害避難行動に関する研究のもう一つのアプローチ方法は、計算機上で住民の避難行動をシミュレーションしようとするものである。

西原[9]は、氾濫解析によって流域の浸水状況を再現すると同時に、避難行動を最短経路選択問

題として定式化する事により、浸水状況と避難行動の関係を議論している。判ら[11]は、名古屋市南部において浸水位変化を考慮した水害避難シミュレーションをおこなった。このシミュレーションでは、住民の集団に伝達確率モデルを用いて避難情報を受け取った人数を決定し、それだけの人数が避難を開始するとして避難行動の再現を試みている。また、高橋ら[10]は、氾濫水のダイナミックな挙動を考慮した避難シミュレーション法を提示し、その手法を京都盆地南部の巨椋流域に適用した。このシミュレーションは、基地局から避難予報が同心円上に広がっていき、住民はこの情報が到達すると同時に避難を開始するというものである。さらに、吉本ら[12]は、鳴瀬川水系吉田川を対象として避難行動のシミュレーションを行っている。このシミュレーションでは、御船川水害時の避難行動に関する調査[6]から作成した家屋構造・避難命令の有無別の浸水位と避難率の関数関係を用いて行動を決定するという手法を用いている。

以上、いずれのシミュレーションも、住民が避難行動を開始した後に避難行動の速度が浸水状況に影響される点に主眼が置かれている。また、ここで取り扱われている避難開始要因は避難命令が伝達されることであり、この伝達状況のみを制御することが共通している。さらに、避難経路の選択においても、住民は避難場所まで最短経路もしくは予め設定した経路を通して移動するという点で共通している。すなわち、これらの避難シミュレーションは住民個々の意識や水害経験の違いを考慮するのではなく、同じ情報に対してはすべての住民が共通の反応をする均質な集団として住民をとらえているという点で、水害避難行動をマクロにとらえたモデルということができる。

一方、本研究では、避難行動の制御の方法等を考察するためのモデルとして、住民の水害に対する意識や過去の水害経験あるいは生活形態など住民個々により異なる条件を反映させた避難行動モデルを開発することをめざしている。このように災害時の人間行動を個人のレベルからモデル化したものをマイクロモデルと呼ぶことにする。避難行動に関するミクロなアプローチは、火災時の部屋からの脱出行動にみることができる。例えば、仁木[13]は、人間を一定の面積を持つ円で表し、脱出時の進路の阻害や迂回行動を多数の円の衝突によってモデル化することにより、部屋の出口付近での混雑状況を再現している。また、大槻ら[14]は、同様に部屋からの脱出行動を扱い、出口や避難方向の選択に際して人間間のコミュニケーションを取り入れたモデル化を行っている。これらの事例は、いずれも火災時の部屋からの脱出行動を対象としているため、災害事象が発生した後の閉鎖空間内での群衆の動きの再現に力が注がれている点に特徴がある。

ところで、水害時の避難行動においては、火災時と脱出行動とは異なり、過去の経験や意識あるいは情報と避難にいたる意思決定過程の関係が重要になる。そこで、本章では、この点に着目し、水害に対する意識、避難場所や避難経路に関する知識、避難情報に対する反応の仕方を、AI手法を用いてシミュレーションに直接反映できる水害避難マイクロモデルを開発する。

### 6.3 水害避難行動を規定する要因とそのモデル化

水害時の避難行動を規定する要因には、個々の流域住民が日常的に持っている水害に対する意識や生活形態および過去の水害経験や知識、水害時に提供される気象情報や避難に関する情報、さらに、避難時の雨量や浸水位などがある。もちろん、以上の要因が避難行動に及ぼす影響は、単純なものではなく、各要因が有機的に絡み合った結果実際の行動が現れると考えなければならない。たとえば、個々人の水害に対する意識や過去の経験が違えば、提供される情報が同じであってもそ

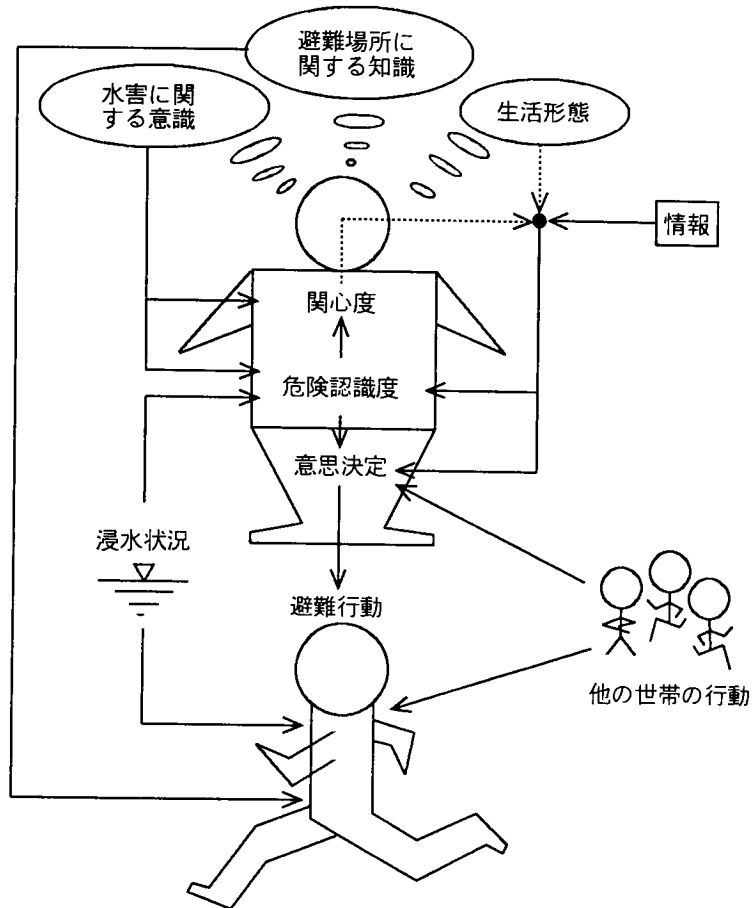


図 6.1: 水害避難行動を規定する要因

れに対する反応の仕方は異なってくる。したがって、水害時の避難行動をシミュレーションするためには、上記要因の相互関係を明らかにし、ルールで記述する必要がある。そこで、本モデルでは、水害避難行動を規定する要因を、

1. 水害経験や意識・生活形態など水害時避難行動に対する初期条件となる要因、
2. 水害時に提供される情報や降雨状況や浸水状況といった外的要因、
3. 水害時に、提供される情報に対する反応の仕方を表す内的要因、

の3つに分類し、それぞれをモデル化する方法を考えている。なお、ここで対象とする各種要因の相互関係を図 6.1 に示しておく。

### 6.3.1 水害避難行動に対する初期条件

水害避難行動に対する初期条件とは、住民が過去の経験などに応じて日常的に持っている水害意識など水害時の情報に対する反応の仕方や行動の背景となるような要因を言い、水害に対する意

識のほか、過去の水害経験や一般的な危険に対する態度・性格、生活形態なども含まれる。これらの要因は、実際に避難行動を制御する情報(例えば避難命令)を住民に与えたときその効果に大きな影響を与えると考えられ、個人レベルの避難行動をシミュレーションしその制御方法を考察する上で重要である。実際、従来行われている水害調査や避難行動調査でもこのような要因が避難行動に与える影響は重視され、調査の対象項目となってきた[2, 3, 6]。もちろん、一口に初期条件といってもその内容は住民の意識や思考内容に関わるものが多く、詳細に把握することは困難である。そこで、本研究では、初期条件を水害に対する意識の型と生活形態の2つに大別して考える。すなわち、過去の水害経験や危険に対する態度といった内的な条件が水害時の行動決定に及ぼす影響をすべて水害意識の型を通じて表現し、生活形態は時刻による情報の入手状況を左右するという形で避難行動に与える影響をモデル化することにする。

まず、水害意識の型については、ここでは、安全視型、やや安全視型、中立型、やや危険視型、危険視型の5つに分類することにした。分類方法は、水害経験者については、過去の水害経験を重視し、水害意識調査でよく用いられている5つの項目[3, 6]、すなわち、「最近経験した水害の程度」、「避難経験の有無」、「前回の水害での避難の有無」、「避難しなかった場合はその理由」、「自宅の安全性に関する評価」を条件として、また、水害未経験者については、過去現地で起こった水害に対する知識を中心に、「過去の水害の知識」、「避難するとしたらそのきっかけ」、「自宅の安全性に関する評価」の3項目を基準として水害意識の型を分類する。

もう一つの初期条件である生活形態については、洪水時の情報入手状況との関連でモデル化することを考え、特に、1日の生活パターンを取り上げることにする。生活パターンの表現は、1日を早朝・朝・昼・夜・深夜の6つの時間帯に分け、これらの時間帯を時刻 $t$ を台集合とするファジイ集合で表す。この方法を用いれば、生活パターンの違いは各時間帯を定義するメンバーシップ関数の形状を変えることで表現でき、各時間帯と情報の入手し易さとの関係をファジイ推論ルール[16]で表現することが可能になる。具体的には、情報の入手し易さの度合いを0～1の実数(情報入手率)で表し、情報入手率 $f(t)$ を台集合とするファジイ集合(大・中・小)と前述の時間帯を表すファジイ集合との関係を記述することになる。

また、避難場所あるいは避難場所に至る経路に関する知識も水害避難行動の初期条件に含めて考えなければならない。そこで、本研究では、特に、経路に関する知識を取り上げ、経路を良く知っているものは各自の家から避難場所に至る最短経路を取るものとし、経路をよく知らないものは、避難場所のある方向に進むとともに、避難中の他の世帯の行動による影響を受けるという形でモデル化している。

### 6.3.2 水害避難行動の外的要因

水害時に住民が受け取る情報には、マスメディアから供給される洪水や気象に関する情報、行政サイドから発せられる避難勧告や避難命令、さらには、住民自身が感じたり見たりする雨量や浸水位などがある。これらの情報は、外部から与えられ住民の避難行動に関する意思決定あるいは行動そのものに影響を与えるという意味で、水害避難行動の外的要因と呼ぶことができよう。もちろん、これらの外的要因が避難行動に与える影響は、その種類・内容によって異なる。避難命令や住民同士の避難勧誘は、避難行動そのものに言及しつつ避難を促すという意味で避難行動に与える効果は直接的である。これに対し、マスメディア等から提供される気象情報は住民の洪水に対する認

識に影響を与え、その後の洪水情報に対する態度や避難決意にいたる意思決定過程に間接的に影響すると考えられる。また、避難開始後であれば、避難経路の浸水状況や降雨状況、避難中の他の世帯の行動などによって、避難行動が円滑に行われるか否かといったことが決まってくる。

そこで本研究では、避難を決意するまでの段階では、気象 水害情報は、住民の洪水の危険性に対する認識<sup>3</sup>を変化させる効果を持ち、危険に対する認識に対して避難命令や住民同士の避難勧誘といった「きっかけ情報」が作用して避難行動を決意するという形で住民の情報に対する反応をモデル化することにする。気象情報としては、「注意報」、「警報」及びこれらの「解除」の3種類を取り扱う。水害情報としては「近隣で洪水が発生した」、「河川水位が警戒水位に達した」、「破堤が起こった」、「破堤の恐れがある」、「浸水の恐れがある」、の5種類を扱うこととする。また、避難行動の「きっかけ情報」として「避難命令」と「住民同士の避難勧誘」の2種類を扱うこととする。

一方、住民が避難を決意し避難行動を開始した後に、実際に避難経路を移動できるかどうかは経路の浸水状況に依存する。また、避難場所や経路に関する知識が確固としたものでなければ、避難中の他の世帯の行動にも依存するであろう。そこで本研究では、避難開始後の行動に影響を与える外的要因として、避難経路上の浸水位と他の世帯の行動とを取り上げ、浸水位は移動速度を左右し、他の世帯の行動は避難経路に関する知識が明確でない世帯（避難場所に至る最短経路ではなく避難場所のある方向に進むケース）の経路選択を左右するという形でモデル化することにした。

### 6.3.3 水害避難行動の内的要因

水害時に住民が避難行動を起こすまでの過程は、6.3.1で述べた水害意識の型や生活の形態といった初期条件に6.3.2で述べた外的要因が反応するプロセスととらえることができる。ただし、ここで注意すべきことは同じ情報であっても住民の危険に対する認識によって対応が異なってくることである。実際、避難命令を受けたにもかかわらず避難しない世帯や避難命令を受ける以前に浸水の様子などから自主的に避難する世帯も多々みられる[3]。そこで、住民が水害に対して危険と考える度合いを表す指標として危険認識度を定義するとともに、避難命令のように直接避難行動に言及するような情報を避難開始のための「きっかけ情報」ととらえ、危険認識度と「きっかけ情報」の相互作用により住民の避難開始決意までのプロセスをモデル化する。

まず、危険認識度  $d(t)$  は、0.0～1.0 までの実数とし、この数値が高いほど世帯は危険を感じているものとする。また、各世帯の危険認識度は、降雨状況や浸水状況、さらに、水害に関する情報によって時々刻々変化するが、変化の程度は各世帯の持つ意識の型によって異なるものとする。実際のシミュレーションでは、危険認識度の大きさをいくつかのファジイ集合で表現し、これと降雨・浸水状況や水害意識の型をファジイ推論ルールで記述するとともに、気象情報や水害情報が危険認識度に与える影響をプロダクションルール[15]で記述し、これらのルールベースをもとに各時刻の危険認識度を算定することになる。さらに、各時刻の危険認識度を算出した後、危険認識度の大きさと上述の「きっかけ情報」とを条件部に組み合わせたルールを用いることで、住民各世帯の危険に対する判断と避難情報との相互作用を表現する。以上の方法で避難命令を受け取る以前の自主避難や避難命令を受け取っても避難しないケースをシミュレーションすることができる。すなわち、自主的な避難行動は、避難命令を受け取る前であっても一定程度以上の危険認識度を持つ世帯は自主的に避難を開始するというルールを用いて表現することになる。また、避難命令を受け取っている

<sup>3</sup>本例では、6.3.3で定義する危険認識度を用いて表現する

にもかかわらず避難しないというケースに対しては、避難命令を受け取った時点で危険認識度が非常に低ければ避難しないといったルールで表現することができる。

以上、危険認識度と避難行動の「きっかけ情報」を組み合わせることで従来のシミュレーションでは再現できなかった自主避難や避難命令に従わないケースを避難シミュレーションに組み入れることができるようになったが、危険認識度の大小は避難の決意に影響を与えるほか、その世帯の水害情報に対する態度にも影響を与えられ、情報の入手状況をモデル化する方法としては、6.3.1で述べた生活パターンと時刻によって情報入手率を変化させる方法があるが、時刻だけで情報入手状況が変わるわけではない。実際、通常的生活パターンでは就寝しているような時刻であっても、すでにその時点で水害の危険性に対する認識が高くなっていれば、テレビやラジオなどから水害に対する情報を入手しようとしているということは容易に想像できる。したがって、情報の入手率は生活パターンと時刻の関係だけでなく、その時点での水害情報に対する関心の深さとの関係で論じる必要がある。そこで、本研究では、各世帯の危険に対する認識に基づく水害情報への態度を0～10の実数で表し、関心度  $c(t)$  と呼ぶこととする(10に近いほど情報を収集しようとする態度が強いものとする)。そして、関心度が時々刻々の危険認識度と初期条件である水害意識の型に応じて変化する様子をファジィ推論ルールで記述することにする。したがって、情報の入手状況は生活パターンと時刻さらに関心度の大小によって変化することになる。

## 6.4 水害避難マイクロモデルの設計

前節では、水害避難行動を規定すると考えられる要因を3つのカテゴリに分類しその取扱い方を考察したが、個々の住民が実際に避難行動を起こすまでには、どのような情報の処理過程が存在するだろうか。避難行動の開始を決定する以前には、気象警報や水害に関する情報の入手、浸水、降雨といった外部状況の把握、避難命令の入手、隣人からの勧誘などをもとにした避難行動の決定に到る情報処理過程がある。避難を決意した後は、避難場所の決定、避難準備、避難開始、避難場所に至る経路の選択等が必要になる。このうち、避難場所や、避難場所までの経路の選択が、具体的に避難行動をおこすうえで不可欠な行動である他、避難行動の際にどれくらいのスピードで移動できるかも避難行動をシミュレーションする上で重要な要素である。さらに避難中においては、避難経路の浸水状況や周囲にいる住民の行動をもとに、避難経路や避難場所を変更する必要があるかどうかを判断することも重要になってくる。

そこで、本研究では各世帯が被災時にとる行動を

1. 情報入手状況を取り扱う過程
2. 避難開始の意思決定過程
3. 避難場所・経路の決定過程
4. 避難行動過程

の4段階に分割して考えることにした。ところで、既に述べたように各過程ごとに複数の情報の処理が必要になるので、避難行動を行う世帯のモデルの中では、複数の情報処理単位が互に関連しながら結論を出すという枠組みが必要になる。そこで、避難行動モデルの設計には、第2,3章で開

発した協調問題解決型洪水制御支援環境の推論システムの枠組みを用いている。これは、処理すべき内容をその項目に応じて複数の処理単位に分割し、各々の処理単位を扱う知識システムを用意し、これらが互いに通信することで全体的な推論を進める方法である。知識システムは、それぞれが処理すべき問題に対する知識を知識ベースに持ち、推論を進めるための推論エンジン データベースおよび他のシステムとの通信機能を備えた一つのエキスパートシステムである。この方法を用いて設計した水害避難マイクロモデルの全体構成を、図 6.2 に示す。図中、二重線で囲った部分が推論を行う知識システムとなっている部分である。表 6.1 に、これら知識システムの持つ知識ベースの概要を示す。

以下、各過程での情報処理過程を簡潔に説明しておく。情報入手状況を取り扱う過程では、まず、時刻を入力として、生活形態に基づく情報の入手率を推論する。さらに、その出力と現段階で各世帯の持つ水害に対する関心度をもとに、情報（水害・気象情報や「きっかけ」情報）の入手率を決定する。実際に各世帯がその時点で提供されている情報を受け取ったかどうかは、情報入手率をもとに乱数によって決定する。避難開始の意思決定過程では、浸水、降雨といった外部状況や上で求めた入手率にしたがって入手した気象・水害情報をもとに危険認識度を算出し、この危険認識度と「きっかけ」情報の内容からから避難開始の意思決定を行うとともに、危険認識度の変化に伴う関心度の変化も決定する。避難場所・経路の決定過程では、各世帯の持つ避難場所・経路に関する知識より、避難場所・経路を決定する。避難行動過程では、各世帯の構成人数、浸水の状態から避難速度を決定するとともに浸水の状態、他の世帯の行動より避難場所・経路の変更の判断を行う。

なお、ここで構成した水害避難マイクロモデルを用いて実際に避難シミュレーションを行うためには、多数の世帯を計算機上に発生させる必要がある。発生すべき世帯は、その知識ベースや推論機構の形態は共通で、知識やデータの内容が異なっている。このように、構造が共通で持つべきデータが異なるようなモデルの表現には、オブジェクト指向プログラミング[17]の提供する抽象化とカプセル化の概念<sup>4</sup>が適している。本モデルの場合、図 6.2 に示した世帯の構造をクラスを用いて定義し、具体的な世帯をそのインスタンスとして発生させることにより、水害意識や知識の異なる多数の世帯と世帯間の通信を計算機上に実現した(モデル記述には smalltalk-80[18]を用いた)。

#### 6.4.1 情報の入手状況を取り扱う過程

ここでは生活形態の違いと水害に対する関心度を用いて各時刻に発表されている情報が入手できたかどうかを決定する。情報の入手状況決定の際に、生活形態の違いと関心度を同時に評価することは可能ではあるが、本研究ではルール作成を簡易化するため、まず生活形態の違いによる情報入手率を決定し、その後で関心度を加味して情報入手率の変更を行うという形をとることとする。すなわち、図 6.2 で示すように、情報入手状況を取り扱うシステムを、生活形態の違いによる情報の入手率を取り扱う知識システムと、関心度に基づき入手率の変更を扱う知識システムとの2つで構成する。

<sup>4</sup>オブジェクト指向プログラミングでは、処理に必要な単位をすべてデータとそれを扱う手続きを持ったオブジェクトと考える(カプセル化)。これら複数のオブジェクトの共通仕様を定義するのがクラスである(抽象化)。また、クラスに定義された内容にしたがって発生させられたオブジェクトをそのクラスのインスタンスという。



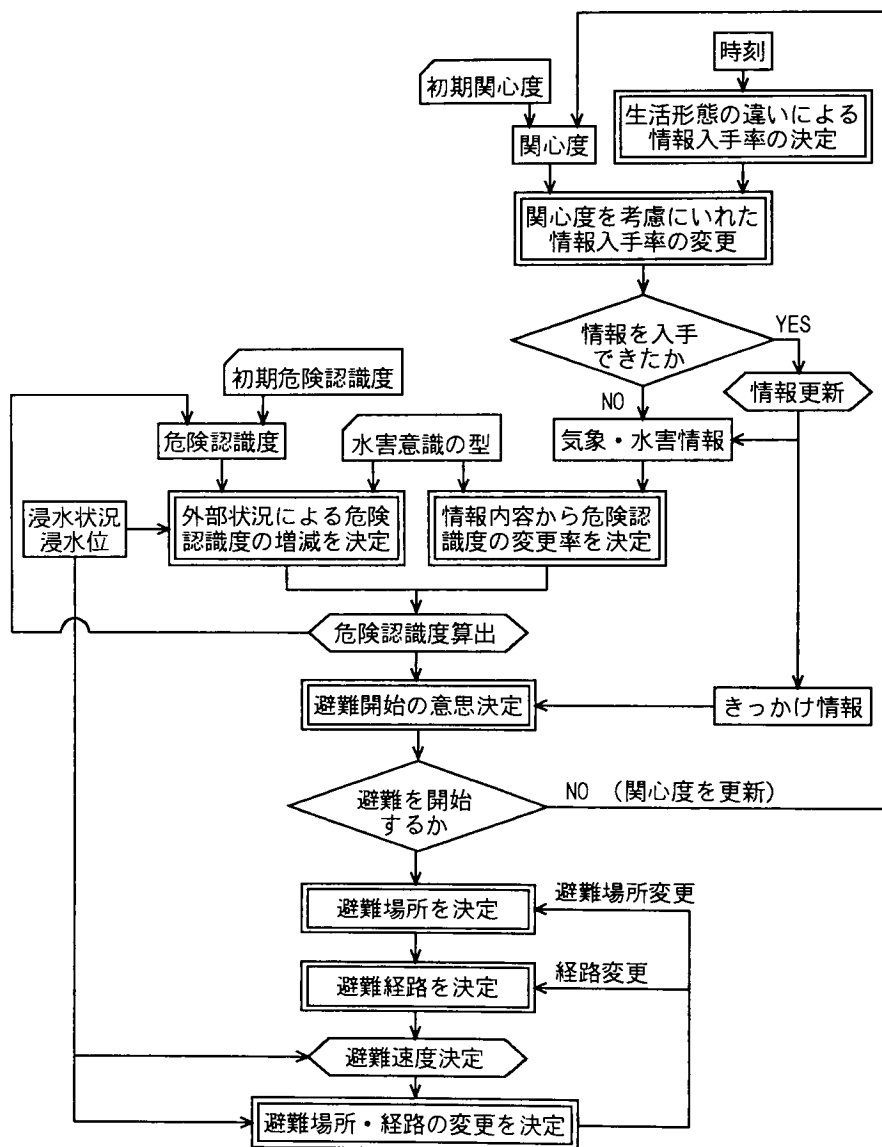


図 6.2: 水害避難マイクロモデルの全体構成

知識システム	前 件 部	後 件 部	推 論 法
水害意識の型 (経験者)	避難経験 前回の水害での避難経験 避難しなかった理由 自分の家の浸水状況	水害意識の型	プロダクション システム
水害意識の型 (未経験者)	水害事例を知っているか 避難する場合のきっかけ 自分の家は浸水すると思うか	水害意識の型	プロダクション システム
生活形態	時刻	情報の入手率	ファジイ推論
関心の高さ	情報の入手率 関心度	最終的な情報入手率	ファジイ推論
外部状況と 危険認識	1 ステップ前との降雨量差 1 ステップ前との浸水位差	危険認識度の変化	ファジイ推論
気象・水害情 報の影響	水害情報 気象情報	危険認識度の割り増し率	プロダクション システム
行動決定	危険認識度 避難命令 避難勧誘 準備状況	行動 関心度の変化	プロダクション システム

表 6.1: 水害避難マイクロモデルを構成する知識システムの概要

## 生活形態による情報入手率を取り扱う知識システム

このシステムは入力変数が時刻  $t$ ，出力が情報入手率  $f(t)$  のファジイ推論システムである。前件部については 6.3.1 で述べたように生活パターンを表現する方法として 1 日を「早朝」, 「朝」, 「昼」, 「夕方」, 「夜」, 「深夜」の 6 つの時間帯にわけ、それぞれ時刻  $t$  を台集合とするファジイ集合  $A_l$  ( $l = 1, \dots, 6$ ) で表現している。生活パターンの違いはファジイ集合を定義するメンバーシップ関数の形を変化させることで表している (例えば、図 6.3 は朝型に対する時間帯の定義である) 後件部については、情報入手率を台集合とする「高い」, 「中ぐらい」, 「小さい」という 3 つのファジイ集合  $B_m$  ( $m = 1, \dots, 3$ ) を考える。そして、前件部と後件部のファジイ集合間の対応関係を

$$\text{IF } t \text{ is } A_l \text{ THEN } f(t) \text{ is } B_m$$

の形で記述したファジイ推論ルールをもとに推論を行い、生活形態別の各時刻 各世帯の情報入手率が算出される。

## 関心度による入手率の変更を取り扱う知識システム

このシステムでは、上で決定した気象 水害情報の入手率を、6.3.3 で述べた水害に対する関心度の高さに応じて変更する。変更には、前件部を生活形態による情報の入手率と関心度、後件部を最終的な情報の入手率とするファジイ推論を用いる。

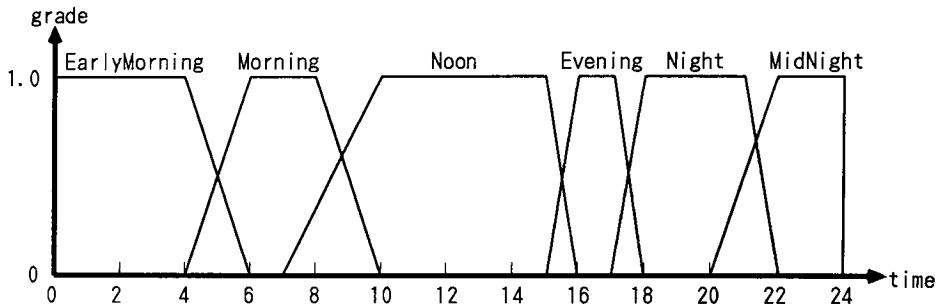


図 6.3: 生活時間帯を表すファジイ集合

前件部の関心度  $c(t)$  と情報入手率  $f(t)$  については、それぞれ「高い」「やや高い」「中」「やや低い」「低い」の5つのファジイ集合に分割する。後件部の最終的な入手率の  $f'(t)$  も同様に5つのファジイ集合に分割している。したがって、本システムで情報入手率の変更を行うファジイ推論ルールは、

$$\text{IF } (f(t) \text{ is } A_l) \text{ and } (c(t) \text{ is } B_m) \text{ THEN } f'(t) \text{ is } C_n$$

と表される。ただし、 $A_l, B_m, C_n$  ( $l, m, n = 1 \sim 5$ ) は、それぞれ、 $f(t), c(t), f(t)$  のファジイ分割である。

以上2つの知識システムの推論を通じて、生活形態と関心度を考慮した気象 水害情報および避難情報の入手率が得られる。この時点で、各世帯が情報を入手できたか否かを決定するために計算機内で0.0～1.0の一樣乱数を発生させ、情報の入手率との大小比較を行う。乱数が情報入手率以下であれば情報を入手できたものとして、その世帯の持つ情報の更新を行う。そうでなければ入手できなかったものとする。

#### 6.4.2 避難開始の意思決定過程

避難行動開始の意思決定過程は、降雨状況や浸水位といった外部状況と気象・水害情報をもとに行われる危険認識度の決定段階と、危険認識度と「きっかけ」をもとに行われる避難行動の意思決定段階に分けられる。以下に推論の流れに沿って、この2つの段階の詳細を説明する。

##### 危険認識度の決定段階

危険認識度は、各時刻・各世帯毎に外部状況から危険認識度を算出する知識システムと情報内容によりその割り増し率を決定する知識システムによる推論を通じて決定される。具体的には、最初に降雨状況と浸水位といった外部状況からファジイ推論を行って危険認識度の前時刻に対する増減量を算出する。次に、各世帯がその時刻に入手した気象 水害情報の内容からプロダクションシステムによって危険認識度の引き上げ(下げ)率を算出する。最終的な、危険認識度の増減量は、前者によって算出された危険認識度と、後者によって算出された引き上げ(下げ)率の積として求める。

外部状況により危険認識度の増減を決定する知識システムでは、外部状況として浸水位と降雨の2つを考えている。ファジイ推論の前件部を1ステップ前の降雨量と現在時刻の降雨量の差と、1ステップ前の浸水位と現在時刻の浸水位の差とし、後件部を危険認識度の増減とする。前件部の

降雨量差 $\Delta r$ と浸水位差 $\Delta l$ については、それぞれ、「大きく上がる」、「中ぐらい上がる」、「少し上がる」、「変わらず」、「少し下がる」、「中ぐらい下がる」、「大きく下がる」の7つのファジイ集合  $A_k$  ( $k = 1, \dots, 7$ ),  $B_m$  ( $m = 1, \dots, 7$ ) に分割する。さらに後件部は危険認識度の増減 $\Delta d$ については、「大きく上がる」、「やや大きく上がる」、「中ぐらい上がる」、「やや小さく下がる」、「小さく上がる」、「変わらず」、「小さく下がる」、「やや小さく下がる」、「中ぐらい下がる」、「やや大きく下がる」、「大きく下がる」の11個のファジイ集合  $C_n$  ( $n = 1, \dots, 11$ ) で表現する。この方法を用いると、メンバーシップ関数の形状を変えることにより水害意識の型の違いによる影響を表現することが可能になる。すなわち、安全視型になるほど危険認識度は増加しにくく減少しやすい形状にし、危険視型になるほど危険認識度は増加しやすく減少しにくい形状にすればよい。したがって、推論ルールは、

$$\text{IF } (\Delta r(t) \text{ is } A_k) \text{ and } (\Delta l \text{ is } B_m) \text{ THEN } \Delta d(t) \text{ is } C_n$$

となる。なお、ルール作成に当たっては、住民の避難開始が降雨状況よりも浸水状況によるところがかかなり大きいと考え、降雨量差よりも浸水位差に重きを置いたルールにした。

一方、気象・水害情報により危険認識度の増減を決定する知識システムでは、上で一旦求めた危険認識度に対し、気象・水害情報の影響を付加するため、住民が受け取った情報の内容に基づいて危険認識度の引き上げ（下げ）幅を算出する。ここでは、気象・水害情報は通常言語形式でしか与えられないことから、モデル化にあたってはプロダクションシステムを用いている。プロダクションルールの前件部には、水害意識の型、各世帯の水害情報・気象情報(6.3.2参照)を用いる。後件部として危険認識度の引き上げ（下げ）率を数値で与える。危険認識度の引き上げ（下げ）幅の上限・下限については、情報の避難行動に与える影響を上で示した外部状況による影響の5割程度と仮定して、上限を+50%、下限を-50%に設定した。また、前件部の気象情報と水害情報の発令状態の組合せをすべて考えると、ルールの数が非常に膨大になり、ルールの作成に大きな負担がかかるだけでなく、情報が避難行動に与える影響の大きさについて解析することも困難になると考えられる。そこで簡単のため、情報の組合せを主要なものだけに限っている。具体的なプロダクションルールは、例えば、「もし世帯の水害意識の型が危険視型で、入手した気象情報が「警報」で、水害情報が「破堤」なら引き上げ率は0.4」といったように記述し、危険認識度の引き上げ（下げ）率を算出する。

#### 避難行動の意思決定段階

ここでは以上の2つの知識システムより得られた新たな危険認識度と「きっかけ情報」の入手状況をもとに、避難行動の決定を行う。避難行動の意思決定を行う知識システムは、前件部に危険認識度、避難命令、隣人の勧誘、避難準備状況の4条件を用いている。危険認識度の値については、本来であればファジイ集合を用いて表現する方が自然であると考えられるが、危険認識度以外の条件がファジイ集合で表現できないので、危険認識度が0.0～0.4の時「低い」、0.4～0.6の時「中ぐらい」、0.6～0.8の時「高い」、0.8～1.0の時「非常に高い」の5つのクリस्प集合を用いて表現することにした。また、「きっかけ情報」については6.3.2でも述べたように、避難命令をうけたかどうか、隣人の勧誘を受けたかどうかの2ケースを取り扱う。

避難準備状況については、その他の項目によって避難開始の決意がなされた時点でその世帯がまだ避難準備を開始していなければ避難準備にかかる時間を決定し、避難準備を既に開始している世帯であれば、準備完了時刻と現在時刻を比べて準備が完了したかどうかを判断する。実際の水害

時には、避難開始の意思決定以前に準備を始める者と、意思決定後に準備を始める者の両者が存在すると考えられるので、危険認識度が比較的低い時点で避難命令等のきっかけ情報を受け取った場合には、避難を決意しないまでも準備は始めるというルールも設定している。ただし、準備開始から避難準備完了までの時間の決定方法については、吉本ら[6]が昭和63年5月の御船川水害時の避難行動に関して行った調査でまとめた避難決意から家を出るまでの時間を準備時間と考え、その分布にしたがう乱数を発生させることにより決定する方法を採用した。

なお、危険認識度の大きさやきっかけ情報の有無は、避難開始の意思決定に直接関係するほか、待機すると決定した場合でもその世帯の関心度に影響を与えられと考えられる。そこで、この知識システムの後件部では意思決定と関心度の変化の両方を扱い、意思決定には「待機」、「避難準備」、「避難開始」を、関心度の変化については数値で与えることにしている。避難開始の決意を扱うプロダクションルールは、例えば、「もし住民の危険認識度は低いが避難命令・隣人の勧誘をうけて避難準備ができていなければ、水害に対する関心の度合いが上がり避難準備をする。」といった形で記述することになる。

#### 6.4.3 避難場所・経路の決定過程

ここでは、避難の必要性を感じた世帯が避難場所、避難経路の決定を行う。避難場所および経路のそれぞれに1つの知識システムを用いて決定過程を表現する。

##### 避難場所の決定の知識システム

避難開始の意思決定を行った後の住民の避難行動をどのような形でモデル化するかは、避難行動のシミュレーションモデルにおいて基本的な問題である。一般に複数ヶ所点する避難施設から住民がひとつの避難施設を選択する際に考慮する要因として、施設の安全性、施設までの距離、施設の周知度、避難経路の有無、避難経路の安全性などが挙げられる。そこで本研究では、避難場所の決定を施設の周知と施設までの距離、および避難経路に関する知識の有無の3つの要因により考えることにする。避難場所の決定は、プロダクションシステムを用いて、

1. 住民が指定避難場所を知っていれば、そこに避難する、
2. 住民が避難場所を知らない場合は何ヶ所かの候補地から最も近い場所を選ぶ、
3. 住民が浸水により避難先を変更する場合は現在の目標避難先以外の候補地から最も近い場所を選ぶ、

の方針で行う。

##### 避難経路決定の知識システム

避難経路の決定に際しては、各世帯が避難場所に至る経路を詳細に知っているケースあるいは避難場所のだいたいの位置はわかるが具体的な経路は知らないといったケースが考えられる。そこで本研究では、避難経路の決定にはプロダクションシステムを用い、

1. 最短経路を進む、

2. 交差点で避難場所のある方角に最も近い道路を逐次的に選択する,

の2通りの方針を記述している。プロダクションルールには、前件部として現在地の道路と進行方向を用い、後件部として次の道路と次の道路での進行方向を1., 2. の方針にしたがって書いておき、経路を逐次選び出していくことにした。

#### 6.4.4 避難行動過程

避難行動過程では、避難時の移動速度の決定や移動中の場所 経路の変更を扱う。

##### 避難時の移動速度の決定

本研究では、避難時の避難速度を規定する要因として浸水位と世帯の構成人数を考えている。世帯の構成人数と移動速度の関係については、今本らの昭和57年の諫早での水害の際の調査[3]を参考に、浸水のない状況での3人世帯の避難速度を45m/分とし、構成人数が1人増える毎に5m/分割り引くことにする。ただし、7人以上の世帯については25m/分としている。

浸水位と移動速度の関係には、西原の方法[9]を用いる。すなわち、平常時の歩行速度を $v_0(\text{m}/\text{min})$ とした時、浸水位 $h(\text{m})$ のときの歩行速度 $v(h)$ を、

$$v(h) = (1 - h/0.7)v_0$$

で与える。この方法では浸水位が0.7m以上になった場合に $v(h)$ の値が負になるが、伊勢湾台風の時に大人の男で浸水位が0.7mのところをやっと脱出できたという事例[10]をもとに、本研究では経路上の浸水位が0.7m以上になった地点は通行不可能ということにして、そのときの避難速度を0m/minとする。

##### 避難場所・経路の変更を決定する知識システム

住民は避難場所を決定し、経路を移動している時に、浸水状況などにより前進が不可能になった場合や、多数の人が逃げている方向と自分が逃げている方向とが違っている場合には進行方向を変えることがあると考えられる。そこで本研究では、避難場所 避難経路の変更を

1. 浸水がひどくてこれ以上進めない時,
2. 多数の人が自分と違う道へ進んでいるとき,

に行う。

具体的には、1. の場合には、避難速度 $v(h) = 0$ となったときつまり浸水位 $h = 0.7\text{m}$ 以上の時に、その世帯は避難場所を変更することにする。また、2. の場合には、避難場所に至る最短経路を知らず避難場所の方向に逐次道路を選んで進んでいる世帯が、その世帯が進んでいる方向と違う方向へ2世帯以上進んでいることを認知した時点でそちらに追従するという方針にした。なお、これらの方針はそれぞれプロダクションルールで表現している。

#### 6.4.5 画面表示システムの設計

本研究では、世帯単位の避難過程の様子を視覚的にとらえられるようシミュレートされた各世帯の行動をアニメーションでグラフィックディスプレイ上に実時間表示する画面表示システムを開発した。本画面表示システムは、図 6.4 に示すように対象地域の道路図を描き、道路図にシミュレーションの対象となっている世帯の位置と浸水状況を時々刻々写し出すものである。図 6.4 では、道路外に描かれた人型が自宅にいる世帯を、道路上のものは避難中の世帯を表している。また、画面左上に現在時刻、発令中の気象情報、水害情報、雨量を表示するとともに対象地域の浸水状況は、浸水位に応じて階調を変える方式で表示している。さらに、各避難場所にはすでにそこに到着した人数を表示することにした。

なお、本画面表示システムの実現には、Smalltalk-80 の MVC(Model-View-controller) モデル [19] を利用している。

#### 6.5 水害経験のシミュレーション

さて、6.4で1つの水害に対する避難行動をシミュレーションする方法が明かとなったが、避難行動シミュレーションを通じて避難の制御方法、特に、情報を出すタイミングや情報内容を詳細に分析して行くためには、1つの洪水での情報の提供の仕方や避難経験がその後の水害時の避難行動にどのような影響を与えるかということ把握しておくことも重要である。実際、過去の水害経験が住民の水害に対する関心を高めた結果、迅速に避難行動が行われる場合もあれば、警報などの情報が頻繁に出された結果、住民の情報に対する関心度がさがり、避難行動に悪影響を与える場合があることも報告されている [3]。したがって、水害避難行動のシミュレーションにおいても連続した洪水に対するシミュレーションを行い、過去の水害経験が次の洪水時の避難行動に影響を与えるといったモデルの可能性、すなわち、水害経験のシミュレーションを行えるモデルを考えていく必要がある。本研究では、その第1段階として、1回の水害経験が6.3.1でモデル化した水害避難行動の初期条件のうち、水害意識の型を変化させるという形式で水害経験をモデル化することにする。すなわち、1つの洪水に対して水害避難シミュレーションを行い、シミュレーション終了時に各世帯の家の浸水状況、避難行動の結果、危険認識度の程度および情報の入手状況を、6.3.1で水害意識の型分類に用いた項目に対応させ、水害経験後の水害意識の型を求め直すことにする。もちろん、実際には洪水を経験してから時間の経過に応じてその経験が忘れ去られていくため、洪水を経験する時間間隔によって水害経験の効果は変わると考えられるが、ここでは時間スケールは考えず、上記の方法で水害経験シミュレーションの可能性を探ることにした。

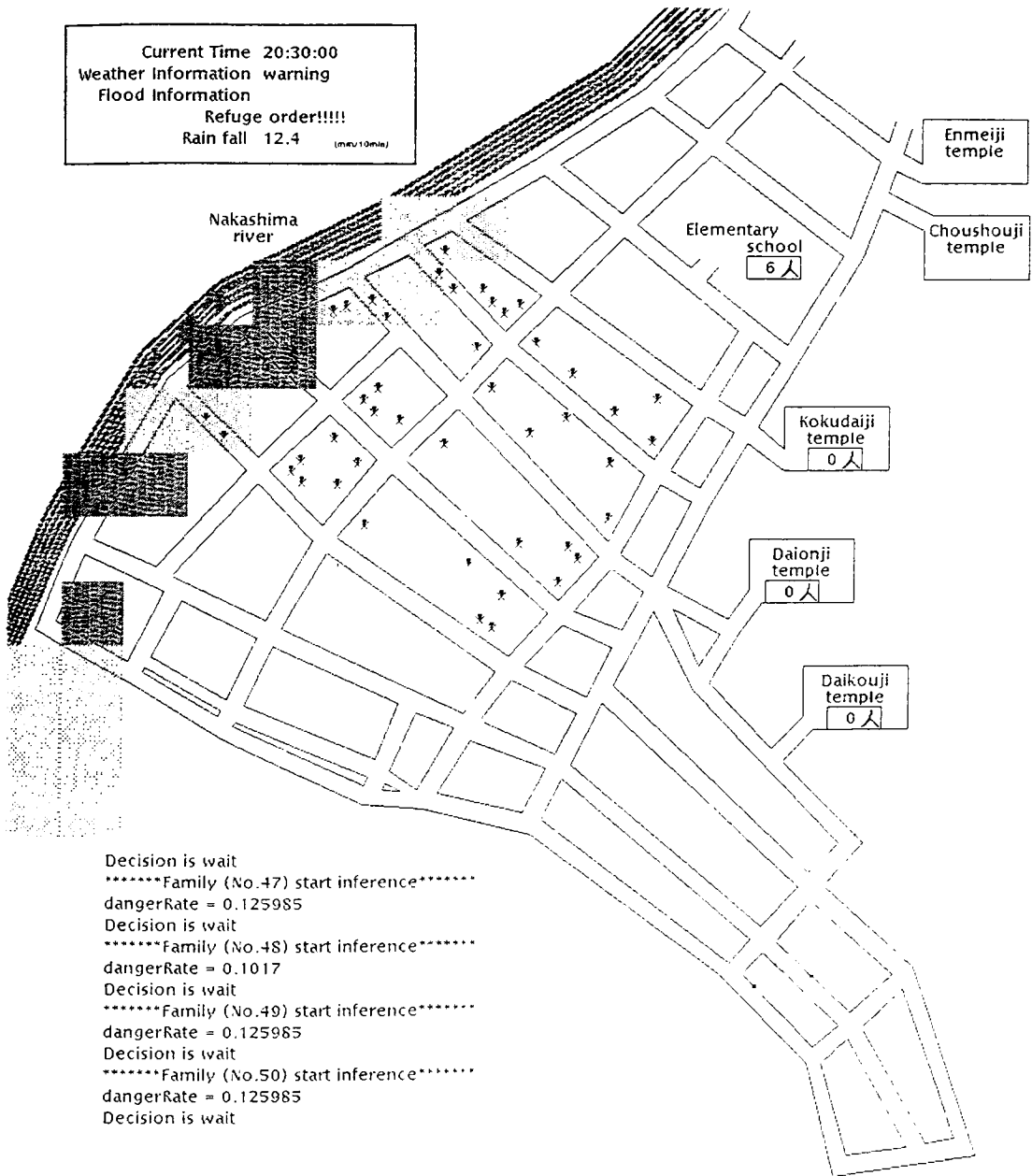


図 6.4: 画面表示システムの出力例



## 6.6 適用と考察

### 6.6.1 適用対象地域の概要

本シミュレーションでは、昭和57年7月23日に長崎をおそった水害を対象にする。この水害は低気圧の接近に伴って活発化した梅雨前線により、昭和57年7月23日の夕刻から夜半にかけて長崎市およびその周辺に日降水量400mm以上という豪雨をもたらした。長崎市内を流れる中島川を氾濫させ、死者・行方不明299人という大惨事をもたらした[3]。この豪雨で記録された1時間降水量187mm(長与町役場18～19時)は、我国観測史上1位に相当するものであり、この時の豪雨の激しさを示している。

本適用例では、氾濫の起こった中島川に隣接する万屋町周辺をシミュレーションの対象地域とした。適用地域を図6.5に示す。万屋町を流れる中島川は、奥山・本河内に水源を発し、本河内高部貯水池、低部貯水池を経て出来大工町付近で西山川と合流し、長崎市の中心街を通過した後、出島町付近で西山川が銅座川と合流し、その直後に長崎湾に流入する二級河川である。全流域面積は約17.3km<sup>2</sup>、河道長は約6.1kmである。なお適用例では、万屋町および古川町の住民を対象に避難行動シミュレーションを行うが、他の地域の避難も考えられるため隣接する古川町まで取扱い地域を広げている。

また、シミュレーション対象地域内の指定避難場所は諏訪町の磨屋小学校になっている。しかし、指定避難場所を知らなかったり、浸水の状態により指定避難場所に行くことができなかった住民は鍛冶屋町の大光寺、大音寺、寺町の皓台寺、長照寺、延命寺に行くことも考えられるので、これらも避難対象の候補地に含めて考えることにする。

この災害における気象警報の発表状況についてみてみると、7月23日の15時25分に大雨洪水注意報が出され、16時50分には大雨・洪水警報に切り替えられている。また、避難情報に関しては、まず、20時30分に長崎県警より報道機関を通じて市民に早期避難の呼びかけが行われ、ついで、21時50分には長崎市災害対策本部より避難指示が発令されるという状況である。また、氾濫水の挙動の再現には、二次元一層モデル[20]を用いており、時々刻々の氾濫状況と避難状況は6.4.5で設計した画面表示システムにより図6.4のようにリアルタイムで表示されている。

### 6.6.2 ミクロモデルによる水害避難シミュレーション

ここでは6.3、6.4節で開発したマイクロモデルを用いて、長崎県中島川流域の万屋町周辺を対象に避難行動シミュレーションを行う。この水害では19時頃から長崎市内で浸水が始まり23時頃に浸水位が減少し始めていることから、本研究ではシミュレーションの対象時間を19時から23時とした。なお、対象地域の万屋町周辺で浸水が始まるのは20時10分である。また、避難シミュレーションの時間間隔については、避難行動を開始するまでは5分間隔とし、避難開始後は単位時間での移動距離が長すぎると避難行動の把握が困難になることを考慮し30秒間隔とした。また、シミュレーション開始時刻にはすべての住民の危険認識度を0.0とした。関心度については、水害意識が危険視型の住民は関心度が高く、安全視型の住民は低いものとし、危険視型の世帯の関心度を5.0とした後、やや危険視型、中立型、やや安全視型、安全視型の世帯の順に関心度を1.0ずつ減じて設定した。生活形態については、住民全体に「朝型」、「昼型」、「夜型」の3通りを、人数的にも地域的にも均等になるように割り当てている。

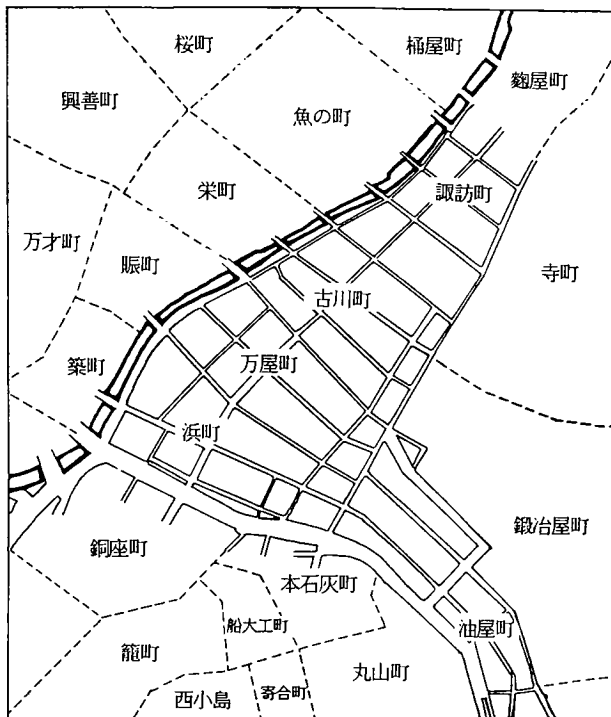


図 6.5: 適用地域の概要

### 水害経験のシミュレーション

ここでは、水害経験のない住民が水害を経験することにより、その前後で水害意識がどの様に変化するかをシミュレーションを通じて観察する。さらに、予め水害意識の型を全世帯に与え、避難シミュレーションを行い、この結果をもとに各世帯の水害意識を再設定し、もう1度シミュレーションを行うことにより、経験による水害意識変化後の水害行動を観察する。これは、1回目の水害を経験した直後にもう1度同規模の洪水に襲われたケースに相当する。

以下に本適用での条件について説明する。

1. 水害意識の型 ... 1回目のシミュレーション時には全世帯に対し、水害・避難とも未経験であり、地理的にみて自分の家は水害に遭う可能性はないと考えており、もし避難を開始するならばきっかけは床上浸水の発生であるという初期条件を与えることにした。この初期条件では、6.3.3で示した方法に全世帯ともに水害意識の型は安全視型となる。なお、2回目のシミュレーション時の水害意識の型は1回目の結果に基づいて各世帯別に自動的に決定される。
2. 避難場所 ... すべての住民が知っているものとし、指定避難場所である磨屋小学校を設定した。
3. 避難経路 ... 避難経験のある住民は最短経路選択ルールを、避難経験のない住民は方角に向かうルールを用いることにした。
4. 気象情報 ... 長崎水害では16時50分に大雨洪水警報が発令されていることから、大雨洪水警報をシミュレーション開始時刻19時の段階から出した状態で適用を行った。

5. 水害情報... 今本ら[3]の調査によれば、長崎市では諫早市に比べて水防組織による活動が十分行われていないことが指摘されており、本適用例では水害情報は発令されないことにした。
6. きっかけ情報... 避難命令と隣人の勧誘との2つを用いる。長崎水害では、20時30分に長崎県警により報道機関を通じて避難の早期呼掛けが行われていることを参考に、シミュレーションでは避難命令を20時30分に出すことにした。また、隣人の勧誘を表現するため水害意識が危険視型の住民が避難開始を決定すると自分が住んでいる家に沿った道路に住んでいる住民を勧誘することになっている。

以上の条件のもとで行った1回目のシミュレーション結果を図6.6(a)に示す。図6.6(a)を見ると、危険認識度が高くなったことによる自主避難はみられず、すべて20時30分の避難命令を受け取ったことにより避難を決意していることが分かる。また、21時40分以後避難している人数が一定であることは、避難開始の遅れた世帯が浸水により動けなくなっている状態を表している。最終的には、シミュレーションの対象とした50世帯のうち30%にあたる15世帯が避難行動を起こす結果となった。避難しなかった35世帯はいずれも中島川から離れた地域の住民で、避難命令を受け取ってはいるが居住地域が浸水していないため危険認識度がそれほど上昇せず、避難しないという結果になったと考えられる。

以上のシミュレーション結果を用いて、各世帯の水害意識の型を再設定した結果「危険視型」「やや危険視型」「安全視型」「やや安全視型」の4つの型の分類となり地理的に図6.6(b)のようになった。図6.6(b)でわかるように、中島川に近い世帯からはほぼ危険視型、やや危険視型、やや安全視型、安全視型となっている。

次に、図6.6(b)に示す意識の型を初期条件として、2回目の水害避難シミュレーションを行った。図6.6(c)は各時刻に避難している人数を水害意識の型別に示したものである。図6.6(c)から、危険視型の水害意識の世帯、やや危険視型の世帯は20時30分の避難命令発令以前に避難をしていることがわかる。また、やや安全視型の世帯は、避難命令発令後、ほぼ10分後に避難を開始しているが、これは、安全視型の世帯が、危険視型の世帯に比べ、水害に対する関心度が低く情報の入手が遅れること、また、同じ情報でもその受け止め型が楽観的であるため避難決意に至るのが遅れることの2つの理由による。さらに、1回目のシミュレーションの際には50人中15人避難を開始していたのが、2回目のシミュレーションは水害意識が安全視型の住民はまったく避難をしていないことがわかる。

水害意識の型別に各世帯の危険認識度を平均した値の時間変化を図6.6(d)に示す。危険視型、やや危険視型の住民の危険認識度が、早く上昇し、この値によって自主避難が誘発されていることが確認できる。危険視型は19時40分から、やや危険視型は20時からやや安全視型は20時30分からグラフの値が一定になっているのは各時刻に該当する意識の型の世帯が全て避難を開始したためである。また、やや危険視型の住民は20時35分ごろから急に危険認識度が上がっているが、これは避難命令の影響が現れたものと考えられる。

以上、2つの洪水を連続して経験するという水害避難シミュレーションを行ったが、本研究で提案した手法で、避難命令を受け取る以前の自主避難や避難命令を受け取っても避難しないというケースが再現できることが確認できたといえる。また、洪水経験を水害意識の型の変化という形でモデル化する手法についても、今後さらに意識変化に関する要因を分析する必要があるが、洪水経

験のモデル化の方法として可能性のあることが確認できたと考えられる。

### 避難命令発令時期の違いによる避難行動の変化

ここでは、避難命令の発令時期の異なる3通りのシミュレーションを行い、住民の避難行動の違いを観察することにより避難命令の適当な発令時期について考察する。シミュレーションの条件は、全世帯とも水害意識の型を中立型としている他は、前項の適用と同様である。ただし、避難命令の発令時期を19時30分(ケース1)、20時(ケース2)、20時30分(ケース3)とする。各ケースのシミュレーション結果を図6.7に示す。図6.7から、避難命令の発令時刻が19時30分の場合(ケース1)と20時の場合(ケース2)では、避難状況がほぼ同じであることが分かる。いずれのケースでも20時前後に大挙して避難を開始しており、20時30分にはほぼ全員の避難が完了している。両ケースとも20時00分頃まではいずれも危険認識度がほぼ等しく19時50分頃に0.6を超え、危険認識度が「高い」の状態になっている。したがって、避難命令を受け取っている世帯は危険認識度が「高い」状態になる19時50分直後に避難を開始し、ケース2においても20時以降避難命令を受け取るとすぐに避難を決意した世帯が多いため、両者の避難状況が似通ったものになったと言える。

続いて、ケース3の結果をみると、まず20時20分頃に第1陣の避難開始が観察できる。これは20時10分から浸水が始まったことにより自主避難が行われたものである。ついで、20時45分頃に第2陣の避難開始が見られるが、これは、20時30分に発令された避難命令により誘導されたものであると考えられる。全員の避難が完了した時刻は21時10分であり、これはケース1,2と比較すると約30分遅れている。ケース1,2の避難状況がほぼ同じであり、これらとケース3の避難完了の差が避難命令の発令時刻の差とほぼ等しいことから、この水害における避難命令は8時頃までに発令するのが適当であり、8時以降であると、避難命令発令の遅延が直接避難行動の遅延という形で現れてくると考えられる。

### 水害情報の効果

気象 水害情報は、水害時の流域住民の危険に対する認識<sup>5</sup>を決定する要因として重要な役割を果たしている。ここでは、的確な水害情報を与えたときの住民の避難行動の違いを観察することにより本モデルにおける水害情報の効果について考察する。シミュレーションの際の水害意識の型は全世帯を中立型とし、避難場所・経路・気象情報・きっかけ情報については、水害経験のシミュレーションの時と同様とする。水害情報については、長崎市内での浸水の開始時刻(19時00分)や、対象地域での浸水の開始時刻(20時10分)を考慮して、19時に「破堤の恐れあり」、19時30分に「破堤」、20時に「浸水の恐れあり」の3種類の水害情報を発令することにする。

以上の条件でシミュレーションを行った際の避難状況を図6.8に示す。図6.8から20時前後に多くの世帯が避難を開始しており、同条件で水害情報を与えなかった図6.7(c)と比較すると、水害情報が危険認識度を割増している効果が現れていることがよくわかる。避難完了状況についても、水害情報を与えた方は20時30分の時点で既に全体の2/3以上の世帯が避難を完了しており、水害情報の住民に与える影響が大きいことを示している。

<sup>5</sup>本研究では危険認識度で表現している

以上、本研究で開発した水害避難マイクロモデルを用いて、昭和57年の長崎水害時の避難行動シミュレーションを行い、モデルの妥当性の検証と問題点の抽出および水害行動の制御を考える立場から、避難命令の発令時期や気象・水害情報の提供方法と避難行動の関係について考えてみた。その結果、本研究で提案した手法で避難命令を受ける以前の自主避難や避難命令を受け取っても避難しないというケースが再現できることが確認できた。また、洪水経験を水害意識の型の変化という形でモデル化する手法も今後さらに意識を構成する要因について検討する必要があるものの洪水経験のモデル化の方法として可能性のあることが確認できた。さらに、避難命令や気象・水害情報の提供方法を変えた場合のシミュレーション結果から、本モデルによって浸水状況との関連から適切な情報提供時期や内容を分析できることが確認できたといえる。

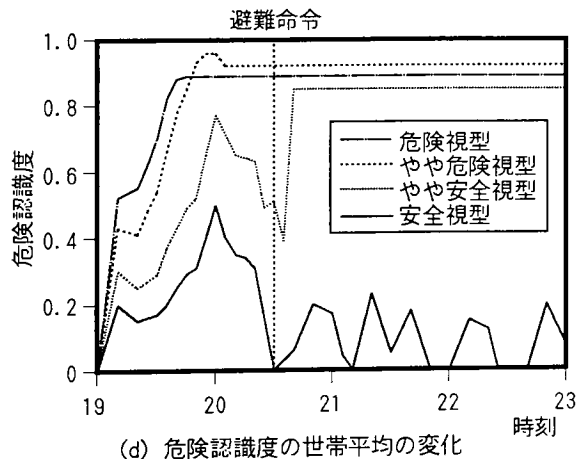
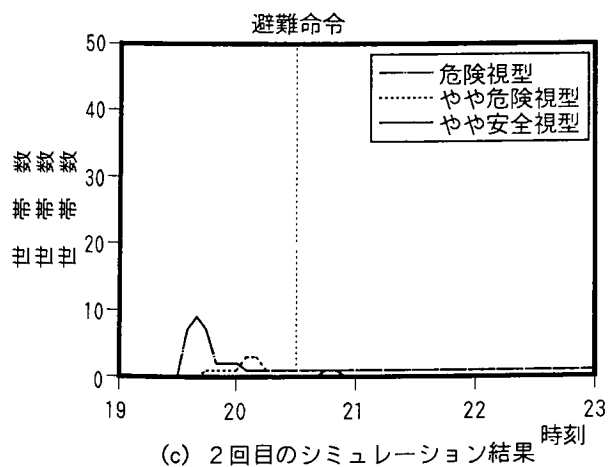
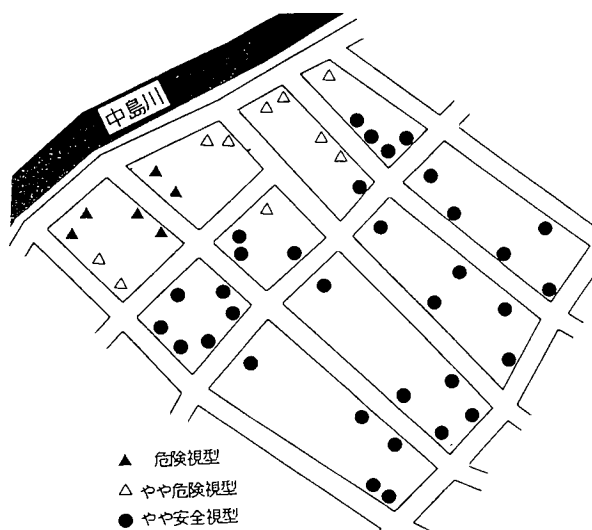
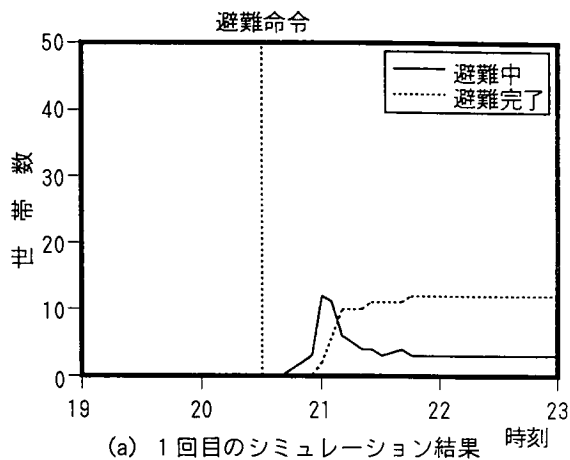
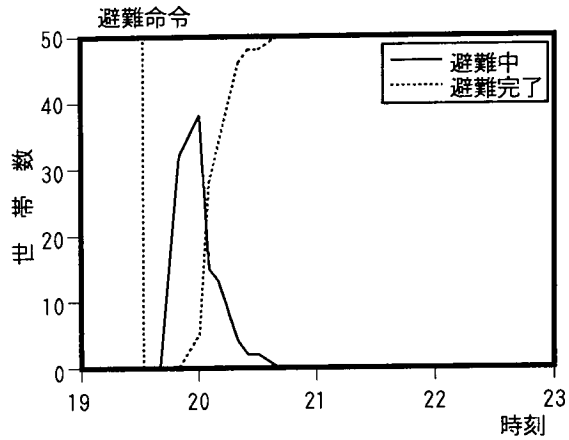
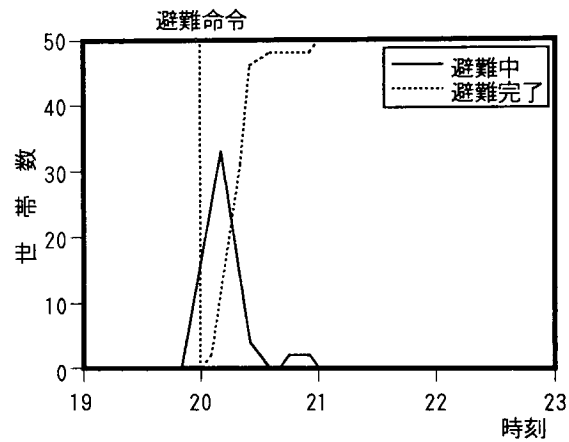


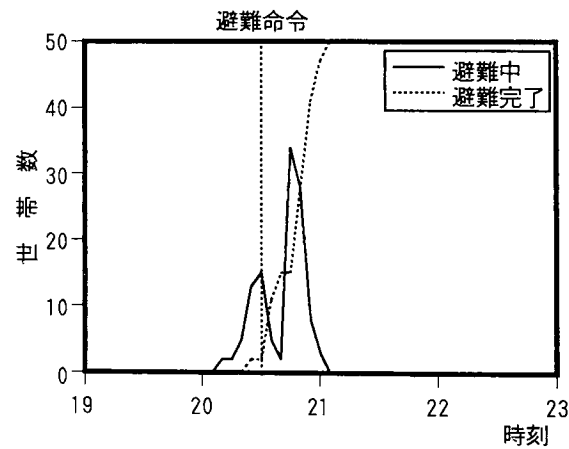
図 6.6: 水害経験のシミュレーション



(a) 避難命令を19時30分に発令した場合の避難状況



(b) 避難命令を20時に発令した場合の避難状況



(c) 避難命令を20時30分に発令した場合の避難状況

図 6.7: 避難命令の発令時期を変えた場合の避難状況

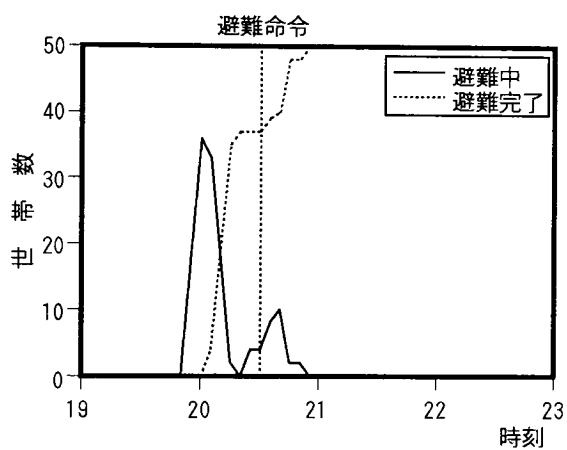


図 6.8: 水害情報を与えた場合の避難状況



## 6.7 結語

本章では、水害時の避難行動の制御方法や情報の伝達方法を分析するため、プロダクションシステムやファジイ推論といったAI手法を駆使して、水害意識や経験などの違いを考慮にいたした個人レベルでの水害避難行動モデルを開発した。さらに、開発した水害避難マイクロモデルを用いて、昭和57年の長崎水害時の避難行動シミュレーションを行い、モデルの妥当性の検証と問題点の抽出、および水害行動の制御を考える立場から、避難命令の発令時期や気象 水害情報の提供方法と避難行動の関係について考えてみた。

本研究で得られた成果を要約すると、

1. 避難行動のモデル化に当たっては、住民の水害時の避難行動を規定する条件を初期条件、外的要因、内的要因の3つに分類・整理した。初期条件については、特に、水害意識の型を定義し、過去の水害経験を水害意識の型の変化を通じて表現することにより、水害経験シミュレーションの可能性を示した。また、内的要因を表現するため危険認識度および関心度を定義するとともに、外的要因である情報を危険認識度に影響を与えるタイプのものと直接避難行動をうながす「きっかけ情報」とに分け、これらの相互作用をモデル化することによって、住民の自主避難や避難命令に従わない状態を再現することに成功した。
2. 具体的なモデルの設計に当たっては、水害時の避難行動を決定するまでの過程を、情報入手状況を取り扱う過程、避難開始の意思決定過程、避難場所・経路の決定過程、避難行動過程の4つの過程に分割し、プロダクションシステム、ファジイ推論システム、協調問題解決手法およびオブジェクト指向プログラミングを取り入れることにより、水害避難行動を計算機上でシミュレーションできる環境を提供した。また、このシミュレーションの様子をリアルタイムで表示する画面表示システムを設計し、避難行動をアニメーションで観察できる環境も提供している。
3. 開発した水害避難マイクロモデルを用いて昭和57年の長崎水害時の避難行動シミュレーションを行い、モデルの妥当性の検証と問題点の抽出を行った。さらに、情報の提供方式を変化させた場合についてシミュレーションを行い、その結果を分析することにより、住民の避難行動特性を考慮にいたした避難行動制御情報の提供方法について考察した。

また、今後の課題として、次のことが挙げられる。

1. 本研究では、水害意識の型と水害経験とを結びつけることによって水害経験をシミュレーションする手法を提案した。しかし、過去の水害経験によって得られた教訓は、時間の経過とともに徐々に忘れられていく。したがって、より現実的に水害経験のシミュレーションを行うためには、教訓の忘却といった現象をモデル化する必要がある。
2. 適切でない情報が提供され続けた場合、住民の情報に対する態度がどのように変化するかといった点も、避難命令を出す側からは重要な問題である。そのためには、住民の情報に対する態度やそれが水害経験によって変化する様子をモデル化する必要がある。

上記課題は、いずれも水害意識を構成する要素とその経験による変化ならびに経時変化に関わるものである。そこで、次章でより細かく水害意識とその変化過程について考察することにする。

## 参 考 文 献

- [1] 青山俊樹：我が国の治水事業の現状と課題，昭和 62 年度河川災害に関するシンポジウム講演要旨集，pp. 16-28，1987.
- [2] 道上正規：水害時の避難行動に関する研究，鳥取大学工学部研究報告第 10 巻，pp. 757-780, 1979.
- [3] 今本博健・石垣泰輔・大年邦雄：昭和 57.7 長崎災害における住民の避難影響行動について，京都大学防災研究所年報，第 26 号 B-2，pp. 127-138, 1982.
- [4] 今本博健・石垣泰輔・大年邦雄：昭和 57.8 大和川水害における住民の避難影響行動について，京都大学防災研究所年報，第 26 号 B-2，pp.139-148, 1982.
- [5] 山田啓一：低平地における浸水時の避難計画に関する一考察—岐阜県安八町の事例から—，水利科学，Vol. 28, No. 3, pp. 62-81.
- [6] 吉本俊裕・須見徹太郎・永友嘉嗣：水害時の避難行動に関する調査報告書—緑川水系御船川昭和 63 年 5 月洪水における避難行動—，土木研究所資料第 2862 号，1990.
- [7] 吉本俊裕・笛田俊治・池田幸徳：水害時の避難行動に関する調査報告書 (2) —六角川平成 2 年 7 月洪水における避難行動—，建設省土木研究所資料第 3098 号，1992.
- [8] 吉本俊裕・笛田俊治・池田幸徳：氾濫特性の異なる流域での避難行動，土木学会水工学論文集，第 37 巻，pp. 233-238, 1993.
- [9] 西原巧：氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究，京都大学博士論文，1983.
- [10] 高橋 保・中川一・東山基：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究，京都大学防災研究所年報第 32 号 B-2，pp. 757-780, 1989.
- [11] 伴勇二 長尾正志・増岡浩仁 高間真司：名古屋市南部における浸水位変化を考慮した水害避難のシミュレーション研究，土木学会第 43 回年次学術講演会概要集，pp. 236-237, 1988.
- [12] 吉本俊裕・須見徹太郎・永友嘉嗣：避難シミュレーション —吉田川(鳴瀬川水系)を事例として—，建設省土木研究所資料第 2933 号，1992.
- [13] 仁木直人：避難行動モデルとそのコンピューター・シミュレーション，文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果 No.A-58-6，被災状況における避難行動の予測と制御に関する研究（研究代表者 三隅二不二），pp. 125-134, 1974.

- [14] 大槻 明・海老原学: オブジェクト指向言語を用いた地震時人間行動シミュレーション, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第5部, pp. 1080-1081, 1989.
- [15] 例えば, 情報処理学会編: 知識工学, オーム社, 1987.
- [16] 菅野道夫: ファジイ制御, 日刊工業新聞社, 1988.
- [17] Cox, B.J.: オブジェクト指向のプログラミング, 前川守監訳, オーム社, 1987.
- [18] Goldberg, A., and Robson, D.: Smalltalk-80 言語詳解, 相磯秀夫監訳, オーム社, 1987.
- [19] Goldberg, A., and Robson, D.: Smalltalk-80 対話型プログラミング環境, 相磯秀夫監訳, オーム社, 1987.
- [20] 井上和也: 開水路非定常流れの数値計算法とその水工学への応用に関する研究, 京都大学博士論文, 1986.

## 第 7 章

# 住民意識の変化過程を考慮した水害避難行動モデルの開発

### 7.1 概説

第 6 章では、流域-人間系を構成する要素の内、被害を受ける側の人間と洪水災害について考え、水害時の避難に関する現地調査の結果を計算機上での避難シミュレーションに反映すべく、世帯レベルの避難行動を心理的側面を含めてシミュレーションできる水害避難マイクロモデルの開発を行った。しかし、避難計画立案や避難行動の制御方法について考察するためには、水害を経験することあるいは長期間経験しないことによる水害意識の変化や、水害を経験した際に提供された情報の適・不適によって変化する住民の情報に対する態度が避難行動に影響を与えるプロセスをモデル化する必要がある。そこで、本章では、水害経験や時間の経過にともなう水害意識の変化を考慮にいった水害時避難行動シミュレーションモデルを開発する。具体的には、水害経験によって影響を受ける住民意識を表す指標として水害危険観と情報依存度を定義し、これら指標が水害を経験すること、あるいは、時間が経過することによって変化する過程をモデル化し、意識変化が避難行動に及ぼす影響をシミュレーションすることを試みる。

### 7.2 水害意識の変化過程とそのモデル化

流域住民は過去の経験から、水害が発生した場合にどのくらいの被害が発生するかについて自分なりの感覚を持っている。そして、実際に水害が発生したときには、過去の経験で対応できる範囲では、自分の経験に従って行動するものと考えられる。もちろん、過去の経験が適切な避難行動を行うことに役立つ場合もあれば、逆に、不適切な行動を惹起する結果となる場合もある。例えば、気象警報が頻繁に出された結果住民が警報に鈍感な状態になってしまい、情報の効果が半減した例や、逆に過去の水害経験が生かされて迅速に避難行動が行われた例が報告されている [1]。したがって、個々の住民の水害時における行動をシミュレーションするためには、住民が日常的に持っている水害意識をモデルに取り入れることが必要になってくる。しかし、水害意識を住民のモデルに持たせるには、その水害意識がどのような要素からなり、どのような過程を経て形成されるのかといったところまでモデル化しなければならない。すなわち、水害経験と水害意識の相互作用をシミュレーションに取り入れることが必要である。また、複数の水害経験を扱う場合、何十年にもわ

たこともある長期間の現象を対象とすることになるため、記憶や意識が時間とともに変化していく過程を考慮する必要もある。そこで、1回の水害経験による水害意識の形成過程とあわせて、時間の経過に伴う水害意識の変化過程もモデル化しなければならない。

住民が持つ水害意識の内容には様々なものがあるが、住民の避難行動を再現するという目的から、避難するかどうかの決定に関係が深い要因を選択してモデルに取り入れることが必要である。まず、避難するかどうかの決断には、自分がおかれている状況が危険なものであるという認識が重要な役割を果たすが、この認識には普段から住民が水害に対してどのような考えを持っているかが影響する。また、情報を与える時期や内容が適切でないと、その後住民は与えられた情報にしたがい難くなる[1]。これは、住民に情報を与えて避難活動を制御することを考えた場合に大きな問題になる。したがって、水害情報を受け取る側の情報に対する評価も水害意識をモデル化する上で重要な要因である。

そこで本研究では、水害意識を表す要因として、各住民が、

1. 「水害をどの程度の被害をもたらすものと考えているか」、
2. 「避難命令などの情報にどのくらい判断を依存するか」

の2つをとりあげる。そして、これらの要因を数値で表し、前者を水害危険観、後者を情報依存度と呼ぶことにする。各住民は、一つの水害のシミュレーションが終って、次の水害が始まるまでに、それぞれの経験と経過した時間の長さに応じて水害危険観と情報依存度の値を変化させる。そして、次の水害のシミュレーションのときに、変化した値を初期条件として持つ。以上の水害意識の変化過程を図7.1に示しておく。

### 7.2.1 水害危険観の導入

住民が普段から持っている水害意識には、水害の危険性に対する一般的な評価がある。この危険性の評価が高いほど、住民は水害時に避難しやすい傾向がある。第6章では、この評価を水害意識の型を用いて表し、水害避難行動の初期条件とした。すなわち、水害を危険と考えている度合いに応じて、住民を安全視型や危険視型等の5つのグループにわけ、各種情報や浸水などの外部状況によって危険認識度の変化する過程が意識の型に応じて異なるというモデルを考えていた。しかし、数種類の型で水害意識を表現する方法では、経験や時間の経過によって水害意識が変化する様子を不連続にしか表現できないなど不自然な点が生じる。そこで、本研究では、流域住民各世帯の水害の危険性に対する一般的評価を、0.0～1.0の数値で表し、水害危険観と呼ぶことにする。この方法によると、水害意識が連続的に変化する様子を無理なく表現できる。ただし、水害危険観はその値が大きいほど水害を危険と考えている度合いが大きいものとする。

水害危険観は住民の水害経験を反映する数値であって、水害から受けた被害の大きさや、住民が水害によって危険を感じた度合いがこの値を決めることになる。既に、過去のアンケート調査から、避難行動や被害軽減活動の有無は、浸水の程度と深い関連があることがわかっているので[2][3]、身体に危険が及んだかあるいは物的被害が生じたかという被害の程度は浸水位で表現できる。そこで、本研究では水害危険観に影響を与える因子として、各世帯の自宅の最高浸水位を採用する。したがって、水害を経験することによる水害危険観の変化は、前件部がもとの水害危険観  $v_0$  と最高

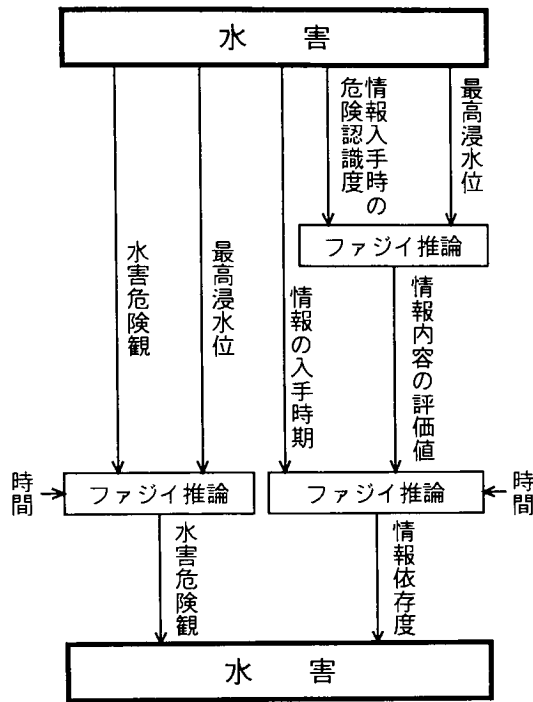


図 7.1: 水害意識の変化過程

浸水位  $l_{max}$ , 後件部が水害危険観の変化量  $\Delta v$  からなるファジィ推論ルール,

$$\text{IF } v_0 \text{ is } A_i \text{ and } l_{max} \text{ is } B_j \text{ THEN } \Delta v \text{ is } C_k$$

で記述することができる。ただし、 $A_i (i = 1, \dots, 4)$ ,  $B_j (j = 1, \dots, 3)$ ,  $C_k (k = 1, \dots, 5)$  は、それぞれ、 $v_0$ ,  $l_{max}$ ,  $\Delta v$  のファジィ分割である。ただし、推論ルールは、もとの水害危険観の大きさと比べて、実際に受けた被害が大きいほど水害危険観は増加し、逆に被害が小さい時は減少する、という方針で記述する。

## 7.2.2 水害情報の評価モデル

住民は様々な情報や浸水の様子などから、現在自分がどの程度危険な状況におかれているかを判断して、次の行動を決定する。このとき、状況の判断をどの程度外部から与えられる情報に依存するかは人によって異なる。例えば、避難命令を受け取ったときに、危険な状況におかれていると判断してすぐに避難する人もいれば、たいして危険はないと考えて対応行動をとらない人もいる。この反応の違いは、人による性格の違いもあるが、過去の水害時における経験の違いが大きく影響している [1, 2, 4, 5]。すなわち、過去の水害時に提供された情報の適・不適によって、住民行動が避難情報によって規定される度合いが異なってくる。第 6 章で設計した水害避難ミクロモデルでは、情報の影響力が過去の経験に関係なく一定であったため、水害経験により住民の情報の解釈の仕方が変化する過程のシミュレーションができなかった。しかし、避難命令などの情報によって避難行

動を制御する方法を探るためには、現地調査から指摘されている警報慣れ[1]などの現象を再現できるほうが望ましい。

そこで、本研究では、各住民が自分の経験から行動を決定する時に水害情報にどの程度依存するかという度合を1.0を中心とする数値で表し、これを情報依存度と呼ぶことにする。ただし、情報依存度の値が大きいほど、住民は行動の決定を情報に依存する傾向が強くなるものとする。また、情報依存度を規定する要因としては、避難情報の内容の適切さと情報が与えられた時期の2種類を取り上げる。

情報内容が適切であったかどうかについては、その情報を提供する側あるいは受け取る側といった立場の違いに応じて様々な尺度が考えられるが、住民の側からみれば、その内容の適切さは、その情報によって正しく事態を把握できたかということで評価できる。しかし一般に、水害時に与えられる情報の内容は、あと何分後に何センチの浸水が起こる、というような形で次に起こる事態を定量的に予想するものではなく、せいぜい堤防が決壊する恐れがあるから避難しなさい、という程度のものである。そこで、本研究では、情報の内容が適切だと判断する根拠を次のように考える。すなわち、住民各世帯が情報を受け取ったときに予想した水害の発生状況と、現実起こった水害の状況が似ているほど、その住民にとって情報の内容が適切なものであったと判断するものとする。

さて、水害避難ミクロモデルでは、現在の水害の発生状況や入手した情報の内容から次の事態を予想して、現在がどのぐらい危険な状況であるかという認識を、危険認識度の値として持っている。したがって、情報から予想した事態の認識は、情報を入手した直後の危険認識度の値で表せる。また、実際に発生した被害の大きさは、7.2.1で述べた理由から、水害中の最高浸水位で表せる。そこで、情報の内容の評価を0.0～1.0の数値で表し(情報を過大評価したほど大きい値をとり、過小評価したほど小さい値をとる)、以下のルールに基づくファジイ推論を用いて、評価値を決定する。

$$\text{IF } l_{max} \text{ is } L_i \text{ and } d_c \text{ is } D_j \text{ THEN } e \text{ is } E_k$$

ただし、 $l_{max}$ ,  $d_c$ ,  $e$  はそれぞれ自宅の最高浸水位、避難決意時の危険認識度、情報内容の評価値であり、 $L_i$ ,  $D_j$ ,  $E_k$  はこれらのファジイ分割である。これにより、情報を受け取ったときの危険認識度が大きかったものの実際の最高浸水位が小さかったケースでは、住民は情報を過大評価したとするようなルールが記述できる。

次に、第2点の情報が与えられた時期と情報依存度の関係について考える。一般に情報は早めに与えられる方が良いと考えられるが、早すぎると緊張感を持続させるのが困難になったり、情報内容と現況の違いが大きいために住民が情報を過小評価してしまったりする危険がある。そこで、情報の入手時期から情報依存度の変化量を求めるファジイ推論ルールの前件部を、上で求められた情報内容の評価値と、情報の入手時期(避難を決意させた情報の入手時刻と自宅が浸水を始めた時刻の差で定義する)の2変数とし、後件部を情報依存度の変化量とする。ルール記述の基本方針は、通常避難先が1時間以内に到達可能範囲にあることから、浸水開始1時間前程度余裕のあった場合に最も情報依存度が高くなるものとする。

なお、この他、次の2ケースについては特に次のように考えたルール記述としている。まず、情報から予想される事態<sup>1</sup>が発生してから情報を入手した場合には、水害の発生という観点からは情報は役に立たなかったことになる。したがって、情報の評価は低くなるかといえは全くそう

<sup>1</sup>それがどんな事態かを判断する方法は、7.3.2で述べる。

とも言い切れない。例えば、避難命令をもっと早期に入手できていれば避難できたとされる場合には、住民は次の水害時にはむしろ積極的に情報収集活動をすることも考えられるし、また、避難命令の発令時期そのものが遅すぎた場合でも、今回の水害で避難命令が役に立たなかったからといって、次の水害時に住民が避難命令に従わなくなるとは考えにくい。ところが、このとき住民は情報に従って判断を下した経験がないことになるから、次の水害時に入手した情報から対応行動を決める際の判断基準を持たない。したがって、情報の入手が遅れたときは情報に対する評価は変化しない、すなわち、情報依存度の値が変化しないルールにする。

また、情報の内容から予想される事態が発生する前に情報を入手でき、かつ、その時に避難開始を決意しなければ避難がスムーズに行えないような場合には、当然情報に対する信頼性が増すと考えられるので、情報依存度の値が大きくなるというルールにする。なお、情報の入手後に対応行動をとる時間的余裕がなかった場合には、この傾向が強まることにする。

### 7.2.3 水害意識の経時変化モデル

複数の水害経験のように、一つの経験から次の経験までの期間が長期にわたる事象をシミュレーションするには、時間の経過にともなって意識が変化する過程をモデル化することが不可欠になる。しかし、残念ながら、記憶の長期的変化のメカニズムについては、まだよくわかっていない。そこで本研究では、一般に考えられている記憶の変化過程に沿うように、2つの水害経験の間隔が開くほど前回の水害経験の影響が薄れていき、水害危険観や情報依存度の変化量がだんだん小さくなると考える。そして、時間の経過に伴い、記憶が曖昧になり水害意識が変化する様子を、水害意識の2つの要素である水害危険観と情報依存度を表現するファジイ集合の台を広げることによって表すことにする。

具体的には、経過した年数 $t$ に応じて、水害危険観や情報依存度の変化量を求めるファジイ推論で用いるメンバーシップ関数<sup>2</sup>の斜辺を横軸に投影した長さを $1+ta$ 倍に広げる(図7.2)。この方法によれば、時間の経過に伴って、前件部に当る一つの変数の値が分割された全てのファジイ集合に適合していき、無限の時間が経過すれば全てのファジイ集合の適合度が1になる。このときの推論結果は、ファジイ推論ルールの後件部を構成するすべてのファジイ集合の和集合のメンバーシップ関数の重心になる。この重心の位置に当る推論結果を変化量の大きさが0.0であるというようにメンバーシップ関数を決めておけば、時間の経過にしたがって水害危険観や情報依存度の変化量が小さくなる、すなわちもともとの意識に近づいていくというルールを記述することが可能になる。したがって、概念的にはあるが、記憶が段々あいまいになる様子が表現できる。

## 7.3 意識変化を考慮する場合の水害避難行動モデルの設計

### 7.3.1 危険認識度の算定モデル

一つの洪水期間中の避難開始の意思決定過程及び移動過程については、基本的には、第6章で述べた水害避難ミクロモデルと同様の考え方を採用する。ただし、本モデルでは、水害意識の変化過程をモデル化するため、水害意識の表現を離散的な型から水害危険観という数値パラメータに変更したので、危険認識度の計算方法を変更しなければならない。過去、水害避難行動や水害意識に

<sup>2</sup>三角形及び台形形状を用いている。



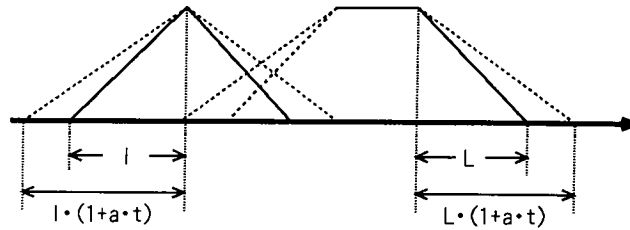


図 7.2: 水害意識の経時変化モデル

関して行われてきたアンケート調査の結果、避難行動に影響を及ぼす要因を抽出することは可能になっているが、これらの要因と行動の関係については、心理学的知見を参考にしつつモデル化を図る必要がある。

心理学の分野では危機的状況下における意思決定のモデルを考案する研究は古くからなされ、種々のモデルが提案されている。特に、人間が、恐怖を引き起こすような状況の刺激<sup>3</sup>を受けた際にどのような過程を経てそれに対する反応をするかといった恐怖コミュニケーション研究は、意思決定論研究の基礎となってきた[6]。このなかで、Sutton[7]は、SEUモデル<sup>4</sup>を恐怖コミュニケーションに適用した[7]意思決定モデルを提案している。このモデルは、恐怖コミュニケーションに対する対応行動は「所与の結果の有用性」と「行動の各選択肢が所与の結果を引き起こす主観的確率」の2つによって決まるとするものである。具体的には、「有用性」×「主観的確率」によって求められたSEUの値のみが意思決定に対して直接の効果を持つものとし、どの行動を選択するかは、各選択肢についてその選択肢を支持したときの問題の事象が起こる主観的確率の差に関連するとしている。

SuttonのSEUモデルは、モデル構造が計算機上に構築しやすいと考えられるとともに、代替案の結果の有用性を、それを選択しなかった場合の負の効用と置き換えて考えれば、SEUは危険認識度に対応する値と考えることができる。そこで、本研究では、SEUモデルを参考にして、水害危険観と危険認識度という2つのパラメーターの橋渡しをする主観的生起確率を導入することにした。すなわち、洪水時の時刻 $t$ の世帯毎の危険認識度 $d(t)$ を以下の式で算出することにする。

$$d(t) = v p(t)$$

ここで、 $p(t)$ は主観的生起確率で、住民が水害時に水害危険観が表しているような状況が発生すると考えている確率である。 $p(t)$ の値は外部状況や情報の内容に応じて時々刻々変化し、この結果、各世帯の危険認識度の値が、各個人が日常持っていた水害危険観の値 $v$ に応じて変化することになる。具体的には、まず、前件部が浸水位・前時刻との浸水位差・降雨量から、後件部が主観的生起確率の変化量から成るファジィ推論ルールを用いて、外部状況による主観的生起確率の変化量を求める。その後、受け取った水害情報や避難情報の内容と情報依存度の値および先に求めた主観的生起確率の変化量をもとに、その時刻の最終的变化量を決定する。この場合、住民にとっての水害の有害さは水害危険観の大きさでしかなく、主観的生起確率がどんなに大きくなっても、危険認識度の値は水害危険観の値より大きくなることはない。すなわち、過去に経験したことのないような被

<sup>3</sup>恐怖コミュニケーションと呼ばれる[6]。

<sup>4</sup>subjective expected utility model

害が予想され、水害の有害さの評価そのものが変わる時は、この枠組では対処できなくなる。そこでこの場合は、直接、危険認識度の値を変えることにする。

なお、最終的な行動の決定は、以上の手順で危険認識度を決定した後、危険認識度の大小と直接避難行動に言及するような「きっかけ情報」の有無をもとに行う。以上述べた1洪水の中の水害避難行動シミュレーションモデルの構成を図 7.3 に、使用している知識システムの概要を表 7.1 に示す。

### 7.3.2 主観的生起確率の決定方法

本研究では、危険認識度を水害危険観と主観的生起確率の積として求めるモデルを提案した。したがって基本的には、洪水の中の世帯毎の危険認識度は、主観的生起確率が時々刻々変化することによって、その世帯が予め持っている水害危険観に応じて変化することになる。主観的生起確率の変化を規定する要因としては、降雨や浸水位あるいは情報が考えられる。そこで、毎時刻各世帯の主観的生起確率の決定は、

1. 降雨と浸水位から主観的生起確率の変化量を求めるファジイ推論と、
2. 入手した情報から主観的生起確率の変化量を求めるファジイ推論

の2段階によって決定する。

#### 降雨・浸水位から主観的生起確率の変化量を決定する推論

前件部に現在の降雨量  $r(t)$ 、自宅の浸水位  $l(t)$ 、現在と1時刻前との浸水位差  $\Delta l(t)$  の3つの変数を考え、後件部に主観的生起確率の変化量  $\Delta p'(t)$  を考えて、推論ルールを

$$\text{IF } r(t) \text{ is } A_i \text{ and } l(t) \text{ is } B_j \text{ and } \Delta l(t) \text{ is } C_k \text{ THEN } \Delta p'(t) \text{ is } D_m$$

で表す。なお、各変数のファジイ分割は、 $A_i$ については現在の単位時間降雨量を台集合とする「多い」「中くらい」「少ない」といった3つのファジイ集合で、 $B_j$ については、自宅の浸水位を台集合とする「高い」「中くらい」「低い」の3つのファジイ集合で、 $C_k$ は現在の浸水位と1時刻前の浸水位の差を台集合とし、「上がる」「変化なし」「下がる」に分類した3つのファジイ集合で表す。また、後件部のファジイ分割  $D_m$  は主観的生起確率の変化量を台集合とする「大きく上がる」「中くらい上がる」「少し上がる」「変化なし」「少し下がる」「下がる」といった6つのファジイ集合で表現している。

#### 入手した情報により主観的生起確率の変化量を決定する推論

この推論は、世帯毎に時刻  $t$  に入手した水害情報・避難情報に基づく主観的生起確率の変更量を決定する。前件部には、情報の評価値  $e$  および前時刻の危険認識度  $d(t - \Delta t)$  を用い、後件部には主観的生起確率の変化量  $\Delta p''(t)$  を用いて、推論ルールを

$$\text{IF } e \text{ is } A_i \text{ and } d(t - \Delta t) \text{ is } B_j \text{ THEN } \Delta p''(t) \text{ is } C_k$$

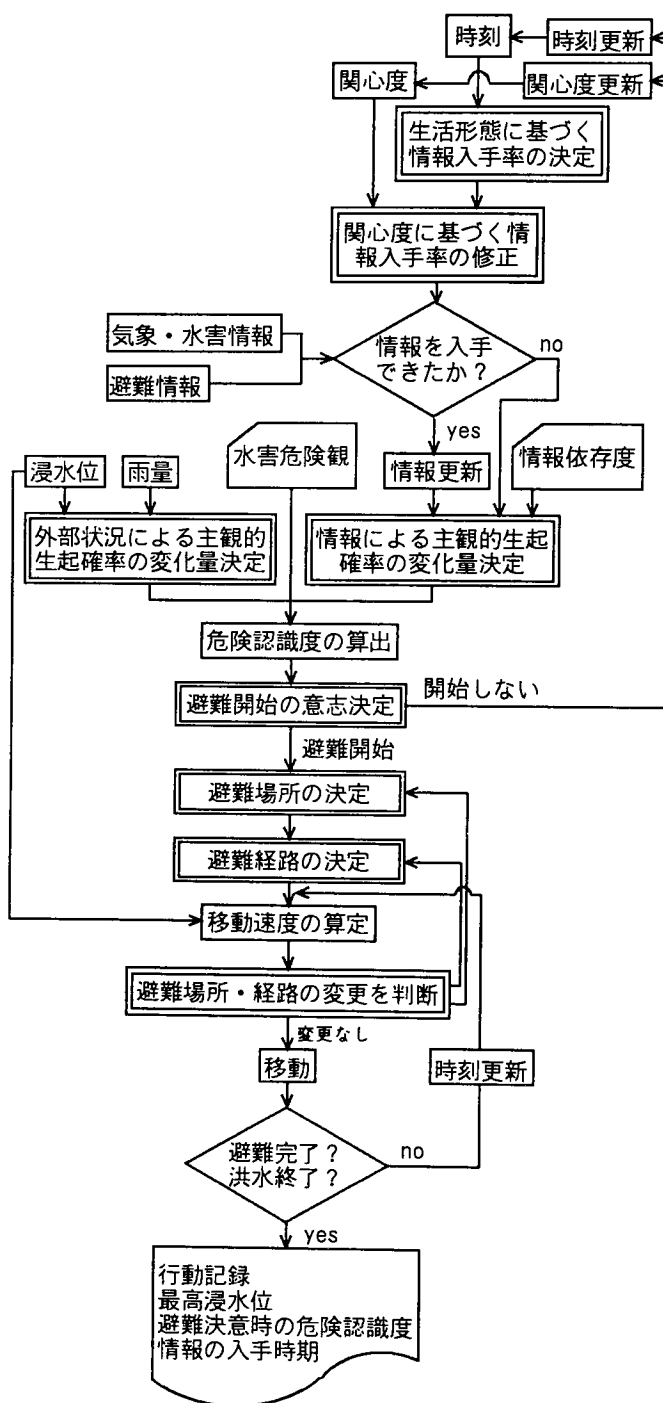


図 7.3: 意識変化過程を考慮した水害避難行動モデルの全体構成

知識システムの機能	前 件 部	後 件 部	推 論 法
生活形態から情報入手率を決定	時刻	情報の入手率	ファジイ推論
関心度により情報入手率を変更	情報の入手率（上で決定） 関心度	最終的な情報入手率	ファジイ推論
外部状況による主観的生起確率の変化量を決定	雨量 浸水位 1 ステップ前との浸水位差	主観的生起確率の変化量	ファジイ推論
情報による主観的生起確率の変化量決定	情報の評価値	主観的生起確率の変化量	ファジイ推論
行動決定	危険認識度 避難情報 避難勧誘 準備状況	行動 （待機・準備・避難） 関心度の変化	プロダクションシステム

表 7.1: 意識変化を考慮した水害避難行動モデルを構成する知識システムの概要

で表す。ここで、情報の評価値  $e$  とは、あらかじめ各々の情報にその内容に応じた値を設定しておく、各世帯が個別に持っている情報依存度をこの値に乗じたもので、情報依存度というフィルターを通して見た情報の避難行動の誘引となる強さを表すパラメータである。なお、 $A_i, B_j, C_k$  は、それぞれ  $e, d(t - \Delta t), \Delta p''(t)$  のファジイ分割である。 $A_i$  は、情報の評価値を台集合として、「非常に高い」「高い」「中くらい」「低い」「非常に低い」の 5 つのファジイ集合で、 $B_j$  は危険認識度を台集合とする「高い」「中くらい」「低い」に分類した 3 つのファジイ集合で、 $C_k$  は主観的生起確率の変化量を台集合とする「大きく上がる」「中くらい上がる」「少し上がる」「変化なし」の 4 つのファジイ集合で表現することにする。

以上の推論により得られた主観的生起確率の変化量  $p'(t), p''(t)$  から各世帯の時刻  $t$  の主観的生起確率  $p(t)$  は、

$$p(t) = p(t - \Delta t) + p'(t) + p''(t)$$

で求められる。ただし、シミュレーション開始時の主観的生起確率は 0 とする。

なお、 $p(t) > 1$  となった場合には、各世帯の水害危険観が表しているような状況もしくはそれ以上の状況が発生すると考えているとして、水害危険観を 1 に修正し危険認識度を算定する。

## 7.4 適用と考察

ここでは、本章で開発したモデルを用いて、1982 年 7 月の長崎水害を想定して避難シミュレーションを行う。対象世帯数は 50 で、対象地域や氾濫計算は第 6 章の適用例と同じである。また、避難の「きっかけ情報」として、実績にしたがったいずれのケースも 20 時 30 分に避難勧告を、21 時 50 分に避難命令を発令するものとした。また、「きっかけ情報」の内隣人の勧誘については、避難を決

意した世帯が20%の確率で隣の世帯に対して避難勧誘を行うものとした。

#### 7.4.1 情報が空振りに終わった場合の水害意識の変化の例

まず、特に情報依存度の変化の効果を見るために、情報が空振りに終わった(避難勧告・指示が発令されたにも関わらず避難の必要がなかった)ケースを想定したシミュレーションを行う。まず、1回目のシミュレーションとして、全く氾濫がおきない状態で20時30分に避難勧告を、21時50分に避難命令を発令する。なお、このときの水害危険観は0.5に、情報依存度は1.0に設定している。1回目のシミュレーション結果を図7.4(a)に示す。浸水が生起しないため、自主的な避難はみられず、避難指示が発令される21時50分以降に避難する世帯があり、最終的に37世帯が避難している。この経験をもとに、7.2で述べた方法によって情報依存度を更新した結果全世帯ともに情報依存度が20%低下するという結果になった。全世帯とも一律に情報依存度が低下したのは、このシミュレーションでは浸水がなく各戸とも最高浸水位が0であったためである。

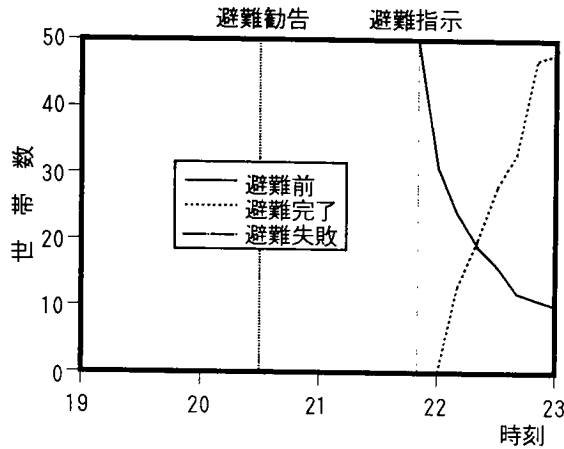
次に、この状態で今度は浸水が実績通り生起するという条件で避難シミュレーションを行う。これは、情報が空振りに終わった後でもう一度水害を経験する状態に相当する。なお、このケースでは1回目の避難と2回目の水害との間の時間経過は考慮していない。2回目の水害時の避難状況は図7.4(b)に示すとおりとなった。1回目のシミュレーションの結果水害危険観、情報依存度がともに低下しているため、避難勧告の発令によって避難行動を起こす世帯はみられず、浸水状況が深刻になった21時20分頃から避難を始める世帯が現れている。また、避難を決意した時点で浸水位が高くなっていたため移動できない世帯(避難失敗)も目立っている。

もちろん、ここで現れている影響が定量的に妥当かどうかについては、今後、現地調査等を含めて検討していかなければならないものの、以上の結果から、本モデルが、適切でない情報が提供されたことによる情報に対する態度の変化が避難行動に及ぼす影響を表現できる構造になっていることが確認できる。

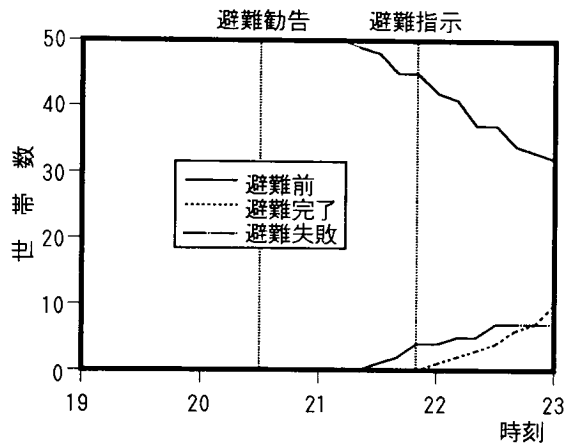
#### 7.4.2 時間の経過が水害意識に及ぼす影響に関するシミュレーション

ここでは、時間が経過することによって水害意識の変化する様子とそれが避難行動に及ぼす影響についてのシミュレーションを行う。まず始めに、各世帯の水害危険観を0.5に、情報依存度を1.0に設定して、避難シミュレーションを行った。なお、この場合は、氾濫計算による浸水状況を与えている。このときの避難状況は図7.5(a)の通りである。避難勧告の出された30分後から避難を始める世帯が徐々に現れ始め、避難指示が出された21時50分から避難をする世帯が急増している。最終的には、37世帯が避難場所にたどりつき、8世帯が避難していない。また、避難に失敗した(避難を決意したが移動できなくなってしまった)世帯が3世帯ある。なお、比較的早い時期に避難できなくなってしまった世帯があるが、いずれも河川に最も近い家屋に住む世帯で、避難を決意した時点あるいはその直後に浸水位がかなり高くなってしまったために移動できなくなったものである。

1回目のシミュレーションによる水害経験の直後の水害危険観および情報依存度の分布を図7.5(b)(c)に示す。両パラメータとも、1回目のシミュレーション時に比べ高くなった世帯と低くなった世帯の2つのグループに分かれている。これは、水害危険観・情報依存度ともに自宅が浸水にあった世帯群では上昇し、逆に自宅が浸水にあわなかった世帯群では低下したためである。なお、自宅が浸水



(a) 1回目のシミュレーション結果



(b) 2回目のシミュレーション結果

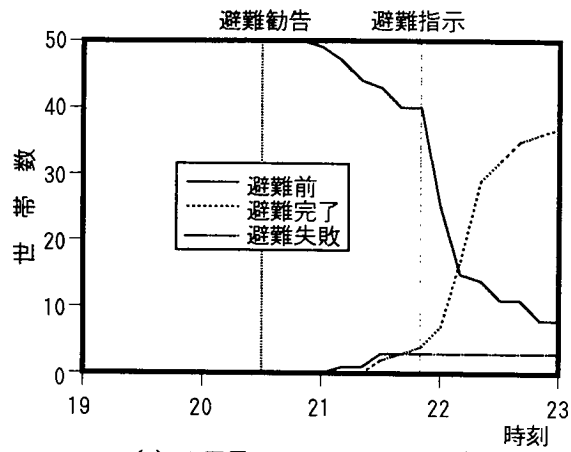
図 7.4: 適切でない情報が避難効果に与える影響に関するシミュレーション

にあわなかったものの避難情報に基づいて避難行動を取った世帯ではこれらパラメータの低下傾向が強くなっている。

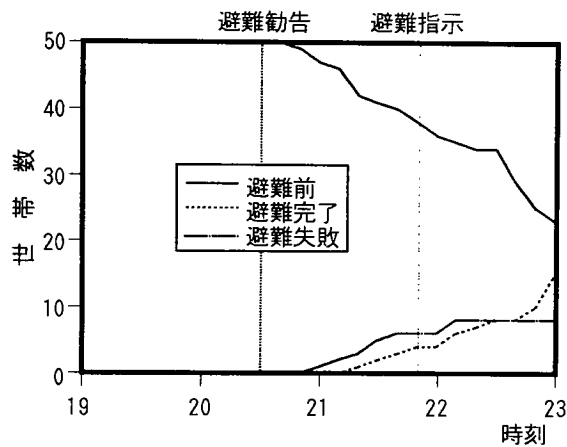
次に、図 7.5 (a) の避難経験をした直後に(時間経過の効果は考えずに)1回目とまったく同じ規模の洪水に襲われた場合を想定して行ったシミュレーション結果を図 7.5 (d) に示す。既に、同規模の洪水を経験しているため、最終的に避難した世帯数が15と1回目のシミュレーションの場合に比べ減少している。これは、1回目の洪水の時に避難したにも関わらず、自宅に浸水のなかった世帯(図 7.5 (b)(c) で水害危険観および情報依存度の低下したグループ)が避難情報にしたがわなかったためである。また、このケースでは、避難指示が出されても1回目のように避難する世帯が急増するといった結果になっていない。これは、1回目のシミュレーションの結果情報依存度が低下した世帯が多かったためである。

さらに、2回目の洪水が1回目の洪水の10年後に起こったという条件で、7.2に述べた手順で、

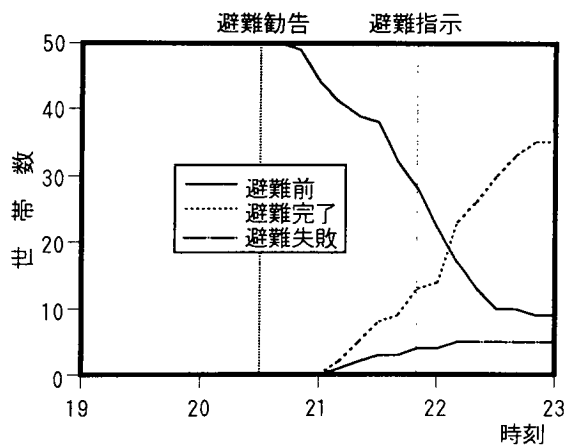
水害危険観、情報依存度を更新してシミュレーションを行った結果を図 7.5 (e) に示す。なお、時間効果を表すパラメータ  $\alpha$  は 0.5 とした。このケースでは避難状況が 1 回目の洪水の時の結果、すなわち図 7.5 (a) と似た状態となっている。これは、1 回目の水害直後には、避難の必要がないと考えていた世帯も時間の経過にともない、1 回目の経験を忘れ、結局、避難決意に対する避難情報の重みが増したことによる。ただし、ここで用いた  $\alpha$  の値は、仮に設定したもので、今後、経過年数とパラメータ値の関係について考えて行かなければならない。



(a) 1回目のシミュレーション結果



(b) 2回目のシミュレーション結果（直後）



(c) 2回目のシミュレーション結果（10年後）

図 7.5: 時間の経過が水害意識に及ぼす影響に関するシミュレーション



## 7.5 結語

本章では、水害経験によって形成される水害意識を表す指標として水害危険観および情報依存度を定義し、これらが水害を経験することあるいは一定期間経験しないことによって変化する過程のモデル化を行い、水害意識の変化が避難行動に及ぼす影響のシミュレーションを試みた。特に、流域住民の水害の危険性に対する漠然とした評価を水害危険観で、提供される情報に対する評価を情報依存度で表現することにより、主として経験した水害の規模に応じて形成される意識と、提供された情報の各住民の側からみた評価とそれに基づく情報に対する態度を避難シミュレーションに組み込むことを可能にしている。この結果、水害避難マイクロモデルは、水害時の避難行動に関して従来現地調査などで指摘されていた現象、すなわち、情報の繰り返しによりその避難行動に与える効果が減少することや時間の経過にともない過去の経験が曖昧な記憶に変化していく様子とその避難行動に与える影響を再現することができる枠組みとなった。

なお、第6章および本章で開発したモデルのように、人間の行動をそのメンタルな動機付けを含んでシミュレートすることを考えた場合、モデルの妥当性を具体的に検証することは容易ではない。特に、水害時の避難行動の場合、火災時の部屋からの脱出行動などの場合とは異なり、実験を行うことは不可能であるし、同一箇所で避難を複数回経験することも少ないからである。しかし、人間行動に関する理解は、現象が生じた際の現地調査とその現象に対する行動を計算機上で再現しようとする試みの両者が互いに関連し合うことで深まると考えられる。したがって、ここで行ったような水害避難行動を規定する要因に対する分析を通じて、今後、パラメータ同定に適した現地調査の方法についても検討していきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] 今本博健・石垣泰輔・大年邦雄：昭和 57.7 長崎災害における住民の避難影響行動について，京都大学防災研究所年報，第 26 号 B-2，pp. 127-138, 1982.
- [2] 吉本俊裕・須見徹太郎・永友嘉嗣：水害時の避難行動に関する調査報告書—緑川水系御船川昭和 63 年 5 月洪水における避難行動—，土木研究所資料第 2862 号, 1990.
- [3] 三上俊治・野田隆・橋元良明 水野博介：集中豪雨—茂原市の事例，文部省科学研究費重点領域研究「災害情報伝達過程の迅速化 正確化に関する研究」研究成果報告書 (代表者：田崎篤朗)，pp.127-152, 1991.
- [4] 今本博健・石垣泰輔・大年邦雄：昭和 57.8 大和川水害における住民の避難影響行動について，京都大学防災研究所年報，第 26 号 B-2，pp.139-148, 1982.
- [5] 道上正規：水害時の避難行動に関する研究，鳥取大学工学部研究報告第 10 卷，pp. 757-780, 1979.
- [6] 池田謙一：意思決定の基礎—緊急時意思決定モデルの展開—，東京大学新聞研究所紀要，pp. 237-289, 1984.
- [7] Sutton,S.R.: Fear-Arousing Communications: A Critical Examination of Theory & Research , Social Psychology and Behavioral Medecin (Eiser, J.R.(Ed.)), Wiley , pp.303-337 , 1982.

## 第 8 章

# 結論

洪水災害の防止・軽減のための施設群は多数建設され、水系別にみてもこれらは巨大なシステムを形作っている。一方、これら施設群によって守られるべき人間活動も都市部への人口の集積資産の蓄積により大規模化・高密度化が進むことで一つの巨大なシステムを形成している。洪水災害を防止あるいは軽減するためには、これら両システムが非常時に互いに連携して適正に機能しなければならない。そのためには、自然現象としての豪雨・出水の機構に関する知見が必要であるとともに、洪水発生場である流域とそこで活動する人間の関わりについても知る必要がある。以上の視点から、本論文では、洪水現象と人間行動の関わる部分、具体的には、洪水とその防御システムを管理する人間との関係および被害主体となる人間との関係に焦点をあて、そのモデル化と管理の方法について考察した。

第 2 章から第 5 章までは、人間の存在を念頭においた洪水制御の支援方法について考察した。

第 2 章では、洪水管理に必要となる多種多量の観測情報・予測情報の処理を支援するシステムの基本的な枠組みを設計した。まず、洪水制御のための貯水池操作の現状とこれまでに提案されてきた適応制御方式の関係について分析し、現在、貯水池操作が直面する問題を明らかにした。ついで、現在行われている操作方式に観測技術・予測技術の進歩の成果を活用して、貯水池操作の信頼性を高めるとともに、適応制御方式で示される理想的な方法と現行操作の橋渡しとなるシステムの必要性を明らかにした。以上の分析をもとに、洪水の制御が降雨・流量の確率予測のように主として数学的なモデル化の適した定量的かつ手続き的なデータ処理と、ダム操作規則のように言語形式で表される知識や実務者個人の資質や経験に依存する情報処理との両者を統合したものであることに注意し、数学的モデル化の可能な問題を処理する手続き型データ処理システムと言語形式で表現される知識の利用機構である推論システムとの協調と、推論システム内部での知識システム間の協調を軸とした協調問題解決型洪水制御支援環境を設計した。また、設計した環境をオブジェクト指向プログラミングの手法を用いて実現し、天ヶ瀬ダムの操作に適用することを通じて、その性能や実用化の可能性を示した。

第 3 章では、ダム操作規則が実務者に要求する判断項目が洪水事象の予測を伴うものであることに注意し、これら判断を、実際の管理に利用できる降雨・流量予測モデルの精度に応じた形で支援できる知識の構成方法について考察した。まず、実務者が予測情報を利用する場合に、その情報を提供するモデルの能力に応じてどのような判断論理を用いているかを分析し、統一的な形式で判断のための知識を生成する方法を提案した。これは、利用可能な予測モデルに対する評価に基づき

判断材料となるべき予測情報と観測情報に対する重みを導入することによって、自動的に支援のためのファジイ推論ルールを作成するものである。ついで、推論システムを構成する知識システム群を、扱う知識の種類や特徴に応じて、クリスプ推論を行うプロダクションシステムとファジイ推論システムとに分類し、両者の協調による洪水制御支援を行うシステムを開発した。さらに、推論結果の提供方法や推論結果に対する根拠の表示方法について考察し、対話型画面表示システムを設計した。このシステムでは、実務者に推論結果並びにデータを表示する部分は、理解しやすいグラフィックス表示とするとともに、推論過程を実務者に対して明示できる機構と、実務者個人の意見を制御結果に反映できる機構を備えている。

洪水制御支援知識ベースシステムが真に実用的なシステムであり続けるためには、システムが稼働し始めた後も、新たに利用可能になった観測情報や予測情報を利用するための知識を取り入れ成長していく必要がある。そこで、第4章では、第2,3章で開発した協調問題解決型洪水制御支援環境を拡張し、判断に利用できる情報のレベルに応じた多段階知識ベース構成法を提案した。まず、現在までに提案された洪水制御支援知識ベースシステムを知識の獲得及び構成法といった観点から分析することを通じて、今後、これらシステムを成長させ実用的なシステムにしていく際には、

1. 現時点での実務者の知識を格納しているだけでなく、降雨予測や流出量予測といった新しい技術やシステムを利用するための知識を容易に格納することのできる環境を持っていること、
2. 知識を構成する論理が理解しやすい構造であること、
3. 各ダムに定められている操作規則の遵守を保証する知識構成であること、

が必要であることを示した。上記条件を満足するとともに、新しい情報に基づく知識を導入した際に問題となる既存知識との整合性を解決する枠組みとして多段階知識ベース構成法を提案し、この実現に不可欠な要素として議長型システム メタ知識システムを設計するとともに、これらを用いてメタ知識システムを頂点とする知識システム群内での協調推論、および知識システム群間の協調推論を実現する環境を構築した。また、洪水制御支援システムを構成する推論システム データ管理システム 手続き型知識システムそれぞれの処理負荷を軽減させるとともに現場での計算機構成にも対応するため、これら各システムを異なる計算機上で稼働させローカルエリアネットワークを通じた情報交換が行える環境を実現した。

第5章では、降雨・流量の観測データが、リアルタイムの降雨予測・流出予測を通じて意思決定の鍵となる情報であることに注目し、降雨・流量観測システムを流域下流端での流量予測精度、特にピーク流量の予測精度を評価基準として設計する方法を展開した。まず、流域内に設ける降雨観測所と流量観測所の数、空間的な配置および観測時間間隔が流域下流端流量の推定精度に及ぼす影響を算定する方法を確率ベクトル場のカルマンフィルター理論を用いることによって導いた。ここで提案した方法は、特に流域内に設ける降雨観測所の総数を考慮するだけでなく、流域内部に設ける流量観測所の効果および降雨観測所と流量観測所の相対的な位置関係をも設計に組み入れることができるという点に特徴がある。また、適用における第一段階として1次元流域モデル上での降雨観測所の設置位置決定問題を扱い、雨量計を1箇所を設定する場合の最も効果の高い設置位置は、常識的に考えられる流域の中心ではなく、流出の速度に応じて流域中央より上流に寄った位置であることを見いだした。

第6, 7章では、洪水の被害を受ける側の人間に焦点を当て、水害時の避難行動を住民の水害意識を考慮しつつ再現するモデルを開発し、避難行動の制御について考察した。

第6章では、水害時の避難行動に関して従来行われてきた現地調査の結果を計算機上での避難行動シミュレーションに直接反映できるモデルとして、プロダクションシステムやファジイ推論といったAI手法を駆使して水害意識や経験などの違いを考慮にいたれた個人レベルでの水害避難行動モデルを開発した。避難行動のモデル化に当たっては、住民の水害時の避難行動を規定する条件を初期条件、外的要因、内的要因の3つに分類・整理した。初期条件については、特に、水害意識の型を定義し、過去の水害経験を水害意識の型の変化を通じて表現することにより、水害経験シミュレーションの可能性を示した。また、内的要因を表現するため危険認識度および関心度を定義するとともに、外的要因である情報を危険認識度に影響を与えるタイプのものと直接避難行動をうながす「きっかけ情報」とに分け、これらの相互作用をモデル化することによって、住民の自主避難や避難命令に従わない状態を再現することに成功した。具体的なモデルの設計に当たっては、水害時の避難行動を決定するまでの過程を、情報入手状況を取り扱う過程、避難開始の意思決定過程、避難場所・経路の決定過程、避難行動過程の4つの過程に分割し、プロダクションシステム、ファジイ推論システム、協調問題解決手法およびオブジェクト指向プログラミングを取り入れることにより、水害避難行動を計算機上でシミュレーションできる環境を提供した。また、このシミュレーションの様子をリアルタイムで表示する画面表示システムを設計し、避難行動をアニメーションで観察できる環境も提供している。開発した水害避難マイクロモデルを用いて1982年長崎水害時の避難行動シミュレーションを行い、モデルの妥当性の検証と問題点の抽出を行った。さらに、情報の提供方式を変化させた場合についてシミュレーションを行い、避難情報の発令時期は早ければよいというものではなく住民の意識や浸水状況との関連で適当な時期があることを確認した。

第7章では、水害時の住民の対応行動が過去の水害経験やそれに基づく情報に対する態度によって大きく影響を受けることに着目し、水害を経験することあるいは長期間経験しないことによる水害意識の変化や、水害を経験した際に提供された情報の適・不適によって変化する住民の情報に対する態度が避難行動に影響を与えるプロセスのモデルを開発した。まず、水害意識の中でも避難行動に影響を与える因子として、日常的に水害をどの程度の被害をもたらすものと考えているかと、避難命令などの情報にどのくらい判断を依存するかの2つをとりあげ、これらを表現するパラメータとして水害危険観、情報依存度を定義した。次に、水害危険観を規定する要因として、流域住民各世帯の自宅の最高浸水位を取り上げ、両者の関係を従来の現地調査結果を踏まえつつファジイ推論ルールを用いて表現した。情報依存度については、水害時に提供された情報の住民側からみた評価基準とこれに基づく情報依存度の変化過程をファジイ推論ルールの形式で記述している。また、これら両パラメータによって表現される水害意識が、時間を経るにしたがい変化していく様子を表現する方法として、上述の推論ルールの前件部を構成するファジイ集合の台を時間経過に応じて広げるという手法を提案した。

以上述べたように、本論文では洪水災害発生を流域-人間系ととらえ、そのモデル化及び管理の方法について検討した。本研究で得られた成果が、洪水災害の防止・軽減に役立つことを願い本論文の結びとしたい。

本研究を進めるにあたり、京都大学工学部高棹琢馬教授には終始懇切なご指導を賜るとともに、本研究に必要となったあらゆる環境を整えて戴いた。京都大学防災研究所池淵周一教授には、おりに触れて適切なご助言を戴いた。心より感謝申し上げます。京都大学工学部椎葉充晴助教授には、研究室での議論を通じて適切なご教示を戴いた。岐阜大学工学部小尻利治教授には、学会・研究会での活動を通じて示唆に富むアドバイスを戴いた。厚く御礼申し上げます次第である。

京都大学防災研究所友杉邦雄助教授、岐阜大学工学部寶馨助教授、京都大学防災研究所中北英一助教授、京都大学工学部立川康人助手にも様々な面で御教示・御助力戴いたことに厚く御礼申し上げます次第である。また、京都大学工学部土木工学教室水工計画学研究室に在籍された学生諸君には本研究のかなりの部分で御助力を戴いた。ここに厚く御礼を申し上げたい。

## Appendix A

# 確率ベクトル場に対するフィルタリング理論の誘導

ここでは、第5章において降雨 流量観測の流出予測精度に与える効果を算定する基礎となる確率ベクトル場のフィルタリング理論を誘導しておく。なお、第5章の理論展開で直接使用するのは、ここで導く系1.6'である。

まず、空間 $\Omega$ 上で定義された確率ベクトル場 $x(\omega)$ 、 $\omega \in \Omega$ と $m$ 次元の確率ベクトル $y$ とを考える。 $y$ の実現値が得られたときの $x(\omega)$ の推定値 $x(\omega|y)$ を求める式として次のような線形式

$$x(\omega|y) = A(\omega)y + b(\omega) \quad (\text{A.1})$$

を考えよう。ただし、 $A(\omega)$ は $m \times n$ 次行列、 $b(\omega)$ は $n$ 次元列ベクトルである。以後、特に断わらない限り、ベクトルはすべて列ベクトルとする。上式中の $x(\omega|y)$ 、 $y$ も列ベクトルである。

全ての $n \times m$ 次行列 $A(\omega)$ 、 $n$ 次元ベクトル $b(\omega)$ の中で

$$\begin{aligned} E_{x,y}[\|x(\omega) - A(\omega)y - b(\omega)\|^2] \\ = E_{x,y}[\{x(\omega) - A(\omega)y - b(\omega)\}^t \{x(\omega) - A(\omega)y - b(\omega)\}] \end{aligned}$$

を最小にする $A(\omega)$ 、 $b(\omega)$ を $\hat{A}(\omega)$ 、 $\hat{b}(\omega)$ とすると、

$$\hat{x}(\omega|y) = \hat{A}(\omega)y + \hat{b}(\omega) \quad (\text{A.2})$$

を確率ベクトル場 $x(\omega)$ の線形最小2乗推定子という。

### 定理1

$x(\omega)$ を空間 $\Omega$ で定義された $n$ 次元確率ベクトル場、 $y$ を $m$ 次元の確率ベクトルとする。これらの平均値、共分散関数が存在するものと仮定し、次のように表す

$$E_x[x(\omega)] = \bar{x}(\omega), \quad E_y[y] = \bar{y} \quad (\text{A.3})$$

$$E_x[\{x(\omega_1) - \bar{x}(\omega_1)\}\{x(\omega_2) - \bar{x}(\omega_2)\}^t] = \Sigma_{x(\omega_1)x(\omega_2)} \quad (\text{A.4})$$

$$E_y[(y - \bar{y})(y - \bar{y})^t] = \Sigma_{yy} \quad (\text{A.5})$$

$$E_{xy}[x(\omega) - \bar{x}(\omega)(y - \bar{y})^t] = \Sigma_{x(\omega)y} \quad (\text{A.6})$$

$$E_{xy}[(y - \bar{y})\{x(\omega) - \bar{x}(\omega)\}^t] = \Sigma_{yx(\omega)} = \Sigma_{x(\omega)y}^t \quad (\text{A.7})$$

さらに、 $\Sigma_{yy}$  は正則と仮定する。このとき、 $y$  が与えられたときの  $x(\omega)$  の線形最小 2 乗推定子は、

$$\hat{x}(x|y) = \bar{x}(\omega) + \Sigma_{x(\omega)y} \Sigma_{yy}^{-1}(y - \bar{y}) \quad (\text{A.8})$$

で与えられる。また、この推定式を用いたときの推定誤差の共分散関数は、

$$E_{xy}[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1|y)\}\{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2|y)\}] = \Sigma_{x(\omega_1)x(\omega_2)} - \Sigma_{x(\omega_1)y} \Sigma_{yy}^{-1} \Sigma_{yx(\omega_2)} \quad (\text{A.9})$$

で与えられる。

(証明)

$$\begin{aligned} f(A, b) &= E_{xy}[\|x(\omega) - A(\omega)y - b(\omega)\|^2] \\ &= E_{xy}[\{x(\omega) - A(\omega)y - b(\omega)\}\{x(\omega) - A(\omega)y - b(\omega)\}^t] \end{aligned}$$

とおき、 $f(A, b)$  を  $A, b$  について偏微分し、それを 0 とおくことにより

$$0 = \frac{\partial f}{\partial A} \Big|_{\hat{A}, \hat{b}} = 2E_{xy}[y\{\hat{b}(\omega) + \hat{A}(\omega)y - x(\omega)\}^t] \quad (\text{A.10})$$

$$0 = \frac{\partial f}{\partial b} \Big|_{\hat{A}, \hat{b}} = 2E_{xy}[-x(\omega) + A(\omega)y + b(\omega)] \quad (\text{A.11})$$

を得る。(A.11) 式より  $b(\omega) = \bar{x}(\omega) - \hat{A}(\omega)\bar{y}$  を得るから、これを (A.11) 式に代入すると

$$E_{xy}[y\{\hat{A}(\omega)(y - \bar{y}) - (x(\omega) - \bar{x}(\omega))\}^t] = 0 \quad (\text{A.12})$$

となる。ここで、恒等式

$$E_{xy}[-\bar{y}\{\hat{A}(\omega)(y - \bar{y}) - (x(\omega) - \bar{x}(\omega))\}^t] = 0 \quad (\text{A.13})$$

を (A.12) 式にたせば

$$E_{xy}[(y - \bar{y})\{\hat{A}(\omega)(y - \bar{y}) - (x(\omega) - \bar{x}(\omega))\}^t] = 0 \quad (\text{A.14})$$

が得られる。したがって、(A.5), (A.6), (A.7) 式の記法を用いると

$$\hat{A}(\omega) = \Sigma_{x(\omega)y} \Sigma_{yy}^{-1} \quad (\text{A.15})$$

を得る。また、 $\hat{b}(\omega)$  は (A.11), (A.15) 式より

$$\hat{b}(\omega) = \bar{x}(\omega) - \Sigma_{x(\omega)y} \Sigma_{yy}^{-1} \bar{y} \quad (\text{A.16})$$

となる。以上から

$$\hat{x}(\omega|y) = \bar{x}(\omega) + \Sigma_{x(\omega)y} \Sigma_{yy}^{-1}(y - \bar{y})$$

を得る。次に、この  $\hat{x}(\omega|y)$  を (A.9) 式の左辺に代入すると (A.9) 式の右辺が得られる。



## &lt;系 1.1&gt;

定理 1 の仮定のもとで

$$\bar{x}(w) = E_x[x(w)] = E_y[\hat{x}(w|y)] \quad (\text{A.17})$$

が成り立つ

(証明) (A.8) 式より明らか

## &lt;系 1.2&gt;

定理 1 の仮定のもとで (A.8) 式による推定子  $\hat{x}(w|y)$  の推定誤差  $x(w) - \hat{x}(w|y)$  は,  $y$  および  $x(w|y)$  と無相関である. すなわち,

$$E_{xy}[y\{x(w) - \hat{x}(w|y)\}^t] = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$E_{xy}[\hat{x}(w|y)\{x(w) - \hat{x}(w|y)\}^t] = 0 \quad (\text{A.19})$$

である.

(証明)

(A.18) 式は (A.10) 式よりただちに導かれる. (A.19) 式の左辺は

$$\begin{aligned} E_{xy}[\{\hat{A}(w)y + \hat{b}(w)\}\{x(w) - \hat{x}(w|y)\}^t] \\ = \hat{A}(w)E_{xy}[y\{x(w) - \hat{x}(w|y)\}^t] + \hat{b}(w)E_{xy}[\{x(w) - \hat{x}(w|y)\}^t] \end{aligned}$$

となるが, 右辺第 1 項は, (A.18) 式により 0, 第 2 項は系 1.1 によって 0 である.

## &lt;系 1.3&gt;

$x(w)$ ,  $y$  の他に,  $y$  とは無相関である  $p$  次の確率ベクトル  $z$  を考える. このとき,  $y$  と  $z$  (すなわち, 確率ベクトル  $[y^t, z^t]^t$ ) が与えられたときの  $x(w)$  の最小 2 乗推定子  $x(w|y, z)$  は

$$\hat{x}(w|y, z) = \hat{x}(w|y) + \hat{x}(w|z) - \bar{x}(w) \quad (\text{A.20})$$

で与えられる. ただし,  $x(w|y)$ ,  $x(w|z)$  はそれぞれ  $y, z$  が得られたときの  $x(w)$  の線形最小 2 乗推定子である. また,

$$\begin{aligned} E_{xyz}[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1|y, z)\}\{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2|y, z)\}^t] \\ = \Sigma_{x(\omega_1)x(\omega_2)} - \Sigma_{x(\omega_1)y} \Sigma_{yy}^{-1} \Sigma_{yx(\omega_2)} - \Sigma_{x(\omega_1)z} \Sigma_{zz}^{-1} \Sigma_{zx(\omega_2)} \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

である. ここに

$$\Sigma_{x(\omega)z} = E_{xz}[\{x(\omega) - \bar{x}(\omega)\}\{z - \bar{z}\}^t] \quad (\text{A.22})$$

$$\Sigma_{zx(\omega)} = E_{xz}[(z - \bar{z})\{x(\omega) - \bar{x}(\omega)\}^t] = \Sigma_{x(\omega)z}^t \quad (\text{A.23})$$

$$\Sigma_{zz} = E_z[(z - \bar{z})(z - \bar{z})^t] \quad (\text{A.24})$$

$$\bar{z} = E_z[z] \quad (\text{A.25})$$

であって,  $\Sigma_{zz}$  は正則とする.

(証明)

$$u = \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \quad \bar{u} = \begin{bmatrix} \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix}$$

とおくと, (A.8)式により

$$\hat{x}(\omega | u) = \bar{x}(\omega) + \Sigma_{x(\omega)u} \Sigma_{uu}^{-1} (u - \bar{u}) \quad (\text{A.26})$$

が成り立つ. ここで,  $y$  と  $z$  は無相関であるから

$$\Sigma_{x(\omega)u} = \begin{bmatrix} \Sigma_{x(\omega)y} & \Sigma_{x(\omega)z} \end{bmatrix} \quad (\text{A.27})$$

$$\Sigma_{uu} = \begin{bmatrix} \Sigma_{yy} & 0 \\ 0 & \Sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{A.28})$$

であることに注意すると, 式 (A.26) から

$$\begin{aligned} x(\omega | u) &= \bar{x}(\omega) + [\Sigma_{x(\omega)y} \quad \Sigma_{x(\omega)z}] \begin{bmatrix} \Sigma_{yy}^{-1} & 0 \\ 0 & \Sigma_{zz}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y - \bar{y} \\ z - \bar{z} \end{bmatrix} \\ &= \hat{x}(\omega | y) + \hat{x}(\omega | z) - \bar{x} \end{aligned}$$

を得る. また, (A.20) 式の推定子に対する推定誤差分散行列は (A.9) 式より

$$\begin{aligned} E_{xu}[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | u)\}\{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | u)\}^t] \\ &= \Sigma_{x(\omega_1)x(\omega_2)} - \Sigma_{x(\omega_1)u} \Sigma_{uu}^{-1} \Sigma_{ux(\omega_2)} \\ &= \Sigma_{x(\omega_1)x(\omega_2)} - \Sigma_{x(\omega_1)y} \Sigma_{yy}^{-1} \Sigma_{yx(\omega_2)} - \Sigma_{x(\omega_1)z} \Sigma_{zz}^{-1} \Sigma_{zx(\omega_2)} \end{aligned}$$

となり, (A.21) 式を得る.

## &lt;系 1.4&gt;

系 1.3 において,  $y$  と  $z$  が必ずしも無相関ではない, すなわち,

$$\Sigma_{yz} = \Sigma_{zy}^t = E_{yz}[\{y - \bar{y}\}\{z - \bar{z}\}^t] \neq 0$$

であるかも知れないとする. このときは

$$\hat{x}(\omega | y, z) = \hat{x}(\omega | y) + \hat{x}(\omega | z - \hat{z}(y)) - \bar{x}(\omega) \quad (\text{A.29})$$

である. また,

$$\begin{aligned} E_{xyz}[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | y, z)\}\{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | y, z)\}^t] \\ &= E_{xy}[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | y)\}\{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | y)\}^t] \\ &\quad - E_{xyz}[\{x(\omega_1) - \bar{x}(\omega_1)\}\{z - \hat{z}(y)\}^t] \{E_{yz}[\{z - \hat{z}(y)\}\{z - \hat{z}(y)\}^t]\}^{-1} \\ &\quad E_{yz}[\{z - \hat{z}(y)\}\{x(\omega_2) - \bar{x}(\omega_2)\}^t] \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

である.

(証明)

系1.2によって $y$ と $z - \hat{z}(y)$ は無相関である。よって、 $y$ と $z$ の実現値が得られたとき、 $y$ と $z - \hat{z}(y)$ が得られたと考えれば系1.3より直ちに

$$\hat{x}(\omega | y, z) = \hat{x}(\omega | y, z - \hat{z}(y)) = \hat{x}(\omega | y) + \hat{x}(\omega | z - \hat{z}(y)) - \bar{x}(\omega) \quad (\text{A.31})$$

を得る。同様に推定誤差の共分散行列は、(A.21)式により

$$\begin{aligned} & E_{xyz}[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | y, z)\}\{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | y, z)\}^t] \\ &= E_{xyz}[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | y, z - \hat{z}(y))\}\{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | y, z - \hat{z}(y))\}^t] \\ &= E_{xyz}[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | y)\}\{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | y)\}^t] \\ &\quad - E_{xyz}[\{x(\omega_1) - \bar{x}(\omega_1)\}\{z - \hat{z}(y)\}][E_{yz}[\{z - \hat{z}(y)z - \hat{z}(y)\}^t]]^{-1} \\ &\quad E_{xyz}[\{z - \hat{z}(y)\}\{x(\omega_2) - \bar{x}(\omega_2)\}^t] \end{aligned}$$

となり (A.30) 式を得る。なお、上の式展開において  $E_{yz}[z - \hat{z}(y)] = 0$  および、(A.9) 式を用いた。

&lt;系1.5&gt;

$x_0(\omega)$ ,  $y$ を互いに結合分布する確率ベクトル場および確率ベクトルとする。 $v$ は $x_0(\omega)$ と $y$ の双方と無相関な確率ベクトルで $x_1(\omega)$ は

$$x_1(\omega) = \Phi x_0(\omega) + v \quad (\text{A.32})$$

で定められる確率ベクトル場とする。ただし、 $x_0(\omega)$ を $n$ 次、 $v$ を $p$ 次とする。 $\Phi$ は $p \times n$ 次の非確率行列である。このとき、

$$\hat{x}_1(\omega) = \Phi \hat{x}_0(\omega | y) + \bar{v} \quad (\text{A.33})$$

$$\begin{aligned} & E_{x_1 y v}[\{x_1(\omega_1) - \hat{x}_1(\omega_1 | y)\}\{x_1(\omega_2) - \hat{x}_1(\omega_2 | y)\}^t] = \\ & \Phi E_{x_0 y}[\{x_0(\omega_1) - \hat{x}_0(\omega_1 | y)\}\{x_0(\omega_2) - \hat{x}_0(\omega_2 | y)\}^t] \Phi^t + E_v[(v - \bar{v})(v - \bar{v})^t] \end{aligned} \quad (\text{A.34})$$

である。

(証明)

まず、定理1により

$$\begin{aligned} & \hat{x}_0(\omega | y) = \bar{x}_0(\omega) + \Sigma_{x_0(\omega)y} \Sigma_{yy}^{-1} (y - \bar{y}) \\ & E_{x_0 y}[\{x_0(\omega_1) - \hat{x}_0(\omega_1 | y)\}\{x_0(\omega_2) - \hat{x}_0(\omega_2 | y)\}^t] = \Sigma_{x_0(\omega_1)x_0(\omega_2)} - \Sigma_{x_0(\omega_1)y} \Sigma_{yy}^{-1} \Sigma_{yx_0(\omega_2)} \end{aligned} \quad (\text{A.35})$$

$$\begin{aligned} & \hat{x}_1(\omega | y) = \bar{x}_1(\omega) + \Sigma_{x_1(\omega)y} \Sigma_{yy}^{-1} (y - \bar{y}) \\ & E_{x_1 y}[\{x_1(\omega_1) - \hat{x}_1(\omega_1 | y)\}\{x_1(\omega_2) - \hat{x}_1(\omega_2 | y)\}^t] = \Sigma_{x_1(\omega_1)x_1(\omega_2)} - \Sigma_{x_1(\omega_1)y} \Sigma_{yy}^{-1} \Sigma_{yx_1(\omega_2)} \end{aligned} \quad (\text{A.36})$$

である。ここで、(A.8) 式と、 $v$ が $x_0(\omega)$ 、 $y$ と無相関であることを用いると

$$\begin{aligned} x_1(\omega) &= \Phi x_0(\omega) + \bar{v} \\ \Sigma_{x_1(\omega_1)x_1(\omega_2)} &= \Phi \Sigma_{x_0(\omega_1)x_0(\omega_2)} \Phi^t + \Sigma_{vv} \\ \Sigma_{x_1(\omega)y} &= \Sigma_{yx_1(\omega)}^t = \Phi \Sigma_{x_0(\omega)y} \end{aligned} \quad (\text{A.37})$$

を得るから、(A.35)、(A.36) を用いて

$$\begin{aligned} \hat{x}_1(\omega | y) &= \Phi x_0(\omega) + \bar{v} + \Phi \Sigma_{x_0(\omega)y} \Sigma_{yy}^{-1} (y - \bar{y}) \\ &= \Phi x_0(\omega | y) + \bar{v} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E[\{x_1(\omega_1) - \hat{x}_1(\omega_1 | y)\} \{x_1(\omega_2) - \hat{x}_1(\omega_2 | y)\}^t] \\ &= \Phi \Sigma_{x_0(\omega_1)x_0(\omega_2)} \Phi^t + \Sigma_{vv} - \Phi \Sigma_{x_0(\omega_1)y} \Sigma_{yy}^{-1} \Sigma_{yx_0(\omega_2)} \Phi^t \\ &= \Phi E_{x_0y}[\{x_0(\omega_1) - \hat{x}_0(\omega_1 | y)\} \{x_0(\omega_2) - \hat{x}_0(\omega_2 | y)\}^t] \Phi^t + \Sigma_{vv} \end{aligned}$$

を得る。

### <系 1.5'>

2つの空間 $\Omega_1, \Omega_2$ の直積空間 $\Omega = \Omega_1 \times \Omega_2$ で定義された $n$ 次元確率ベクトル場 $x_0(\omega), \omega = (t, s) \in \Omega, t \in \Omega_1, s \in \Omega_2$ と、 $x_0(\omega)$ と互いに結合分布する確率ベクトル $y$ を考える。また、 $x_1(t)$ を

$$x_1(t) = \int_A h(s) x_0(t, s) ds \quad (\text{A.38})$$

で定められる確率ベクトル場とする。 $h(s)$ は空間 $\Omega_2$ で定義される $p$ 次元非確率ベクトル場である。また、 $A \subset \Omega_2$ とする。このとき、

$$\hat{x}_1(t) = \int_A h(s) \hat{x}_0(t, s | y) ds \quad (\text{A.39})$$

$$\begin{aligned} E_{x_1y}[\{x_1(t_1) - \hat{x}_1(t_1 | y)\} \{x_1(t_2) - \hat{x}_1(t_2 | y)\}^t] \\ = \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) E_{x_0y}[\{x_0(t_1, s_1) - \hat{x}_0(t_1, s_1 | y)\} \{x_0(t_2, s_2) - \hat{x}_0(t_2, s_2 | y)\}^t] \{h(s_2)\}^t \end{aligned} \quad (\text{A.40})$$

である。

(証明)

定理 1 により

$$\hat{x}_0(t, s | y) = \bar{x}_0(t, s) + \Sigma_{x_0(t,s)y} \Sigma_{yy}^{-1} (y - \bar{y}) \quad (\text{A.41})$$

$$E_{x_0y}[\{x_0(t_1, s_1) - \hat{x}_0(t_1, s_1 | y)\} \{x_0(t_2, s_2) - \hat{x}_0(t_2, s_2 | y)\}^t] = \Sigma_{x_0(t_1,s_1)x_0(t_2,s_2)} - \Sigma_{x_0(t_1,s_2)y} \Sigma_{yy}^{-1} \Sigma_{yx_0(t_2,s_2)}$$

$$\hat{x}_1(t) = \bar{x}_1(t) + \Sigma_{x_1(t)y} \Sigma_{yy}^{-1} (y - \bar{y}) \quad (\text{A.42})$$

$$E_{x_1y}[\{x_1(t_1) - \hat{x}_1(t_1 | y)\} \{x_1(t_2) - \hat{x}_1(t_2 | y)\}^t] = \Sigma_{x_1(t_1)x_1(t_2)} - \Sigma_{x_1(t_1)y} \Sigma_{yy}^{-1} \Sigma_{yx_1(t_2)}$$

である。ここで

$$\begin{aligned}
 \bar{x}_1(t) &= \int_A h(s) \bar{x}_0(t, s) ds \\
 \Sigma_{x_1(t_1)x_1(t_2)} &= E[\{\int_A h(s) x_0(t_1, s) ds - \int_A h(s) \bar{x}_0(t_1, s) ds\} \{\int_A h(s) x_0(t_2, s) ds - \int_A h(s) \bar{x}_0(t_2, s) ds\}^t] \\
 &= \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) E[\{x_0(t_1, s_1) - \bar{x}_0(t_1, s_1)\} \{x_0(t_2, s_2) - \bar{x}_0(t_2, s_2)\}^t] h^t(s_2) \\
 &= \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) \Sigma_{x_0(t_1, s_1)x_0(t_2, s_2)} h^t(s_2) \\
 \Sigma_{x_1(t)y} &= \Sigma_{y x_1(t)}^t = \int_A h(s) \Sigma_{x_0(t, s)y} ds
 \end{aligned} \tag{A.43}$$

であることに注意すれば, (A.41), (A.42) を用いて

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_1(t) &= \int_A h(s) \bar{x}_0(t, s) ds + \int_A h(s) \Sigma_{x_0(t, s)y} ds \Sigma_{yy}^{-1} (y - \bar{y}) \\
 &= \int_A h(s) \hat{x}_0(t, s | y) ds
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &E_{x_1 y}[\{x_1(t_1) - \hat{x}_1(t_1 | y)\} \{x_1(t_2) - \hat{x}_1(t_2 | y)\}] \\
 &= \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) \Sigma_{x_0(t_1, s_1)x_0(t_2, s_2)} \{h(s_2)\}^t - \int_A h(s) \Sigma_{x_0(t_1, s)y} ds \Sigma_{yy}^{-1} \int_A \Sigma_{y x_0(t_2, s)} h^t(s_2) ds \\
 &= \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) \{\Sigma_{x_0(t_1, s_1)x_0(t_2, s_2)} \Sigma_{x_0(t_1, s_1)y} \Sigma_{yy}^{-1} \Sigma_{y x_0(t_2, s_2)}\} h^t(s_2) \\
 &= \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) E_{x_0 y}[\{x_0(t_1, s_1) - \hat{x}_0(t_1, s_1 | y)\} \{x_0(t_2, s_2) - \hat{x}_0(t_2, s_2 | y)\}^t] h^t(s_2)
 \end{aligned}$$

を得る。

### <系 1.6 >

$x(\omega)$ ,  $Y$  を互いに結合分布するそれぞれ  $n$  次,  $p$  次の確率ベクトル場および確率ベクトルとする。また,  $u$  は  $x(\omega), Y$  とは無相関な  $m$  次確率ベクトルとする。このとき,  $m$  次の確率ベクトル  $y$  が,  $m \times n$  次非確率行列  $H$  と  $u$  を用いて

$$y = Hx(\omega_0) + u \tag{A.44}$$

で定められるとする。なお,  $\omega_0$  は固定されているとする。また,

$$\begin{aligned}
 E[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | Y)\} \{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | Y)\}^t] &= P(\omega_1, \omega_2) \\
 E[u] &= \bar{u} \\
 E[(u - \bar{u})(u - \bar{u})^t] &= R
 \end{aligned} \tag{A.45}$$

と書く。  $R^{-1}$  は存在すると仮定する。このとき,

$$\hat{x}(\omega | Y, y) = \hat{x}(\omega | Y) + P(\omega, \omega_0) H^t \{H P(\omega_0, \omega_0) H^t + R\}^{-1} \{y - H \hat{x}(\omega_0 | Y) - \bar{u}\} \tag{A.46}$$

$$\begin{aligned}
 &E[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | Y, y)\} \{x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | Y, y)\}^t] \\
 &= P(\omega_1, \omega_2) - P(\omega_1, \omega_0) H^t \{H P(\omega_0, \omega_0) H^t + R\}^{-1} H P(\omega_0, \omega_2)
 \end{aligned} \tag{A.47}$$

が成り立つ。

(証明)

系 1.4 より

$$\hat{x}(\omega | Y, y) = \hat{x}(\omega | Y) + \hat{x}(\omega | y - \hat{y}(Y)) - \bar{x}(\omega) \quad (\text{A.48})$$

である。そこで、まず  $\hat{y}(Y)$  を求めることを考える。いま、 $x(\omega_0)$  と  $y$  は互いに結合分布する  $n$  次、 $m$  次の確率ベクトルであるから、確率ベクトルの線形最小 2 乗推定の理論により

$$\hat{y}(Y) = H \hat{x}(\omega_0 | Y) + \bar{u} \quad (\text{A.49})$$

$$\begin{aligned} E_{y,Y}[\{y - \hat{y}(Y)\}\{y - \hat{y}(Y)\}^t] \\ &= H E_{x,Y}[\{x(\omega_0) - \hat{x}(\omega_0 | Y)\}\{x(\omega_0) - \hat{x}(\omega_0 | Y)\}^t] H^t + E_u[(u - \bar{u})(u - \bar{u})^t] \\ &= H P(\omega_0, \omega_0) H^t + R \end{aligned} \quad (\text{A.50})$$

である。次に、 $\hat{x}(\omega | y - \hat{y}(Y))$  を求める。簡単のため

$$\tilde{y} = y - \hat{y}(Y) = H\{x(\omega_0) - \hat{x}(\omega_0 | Y)\} + (u - \bar{u}) \quad (\text{A.51})$$

とおくと

$$\bar{\tilde{y}} = E_{y,Y}[y - \hat{y}(Y)] = E_y[y] - E_Y[\hat{y}(Y)] = 0 \quad (\text{A.52})$$

$$\Sigma_{\tilde{y}\tilde{y}} = E_{y,Y}[\tilde{y}\tilde{y}^t] = H P(\omega_0, \omega_0) H^t + R \quad (\text{A.53})$$

である。また

$$\begin{aligned} \Sigma_{x(\omega)\tilde{y}} &= E_{x,Y}[\{x(\omega) - \bar{x}(\omega)\}\tilde{y}^t] \\ &= E[\{x(\omega) - \hat{x}(\omega | Y) + \hat{x}(\omega | Y) - \bar{x}(\omega)\}\{(x(\omega_0) - \hat{x}(\omega_0 | Y))\}^t] H^t \\ &= \{E[\{x(\omega) - \hat{x}(\omega | Y)\}\{(x(\omega_0) - \hat{x}(\omega_0 | Y))\}^t] + E[\hat{x}(\omega | Y)\{(x(\omega_0) - \hat{x}(\omega_0 | Y))\}^t] \\ &\quad - \bar{x}(\omega_0)E[x(\omega_0) - \hat{x}(\omega_0 | Y)]^t\} H^t \end{aligned}$$

ここで、系 1.2 により右辺第 2 項は 0、また系 1.1 によって第 3 項も 0 となり、結局

$$\Sigma_{x(\omega)\tilde{y}} = E[\{x(\omega) - \hat{x}(\omega | Y)\}\{(x(\omega_0) - \hat{x}(\omega_0 | Y))\}^t] H^t = P(\omega, \omega_0) H^t \quad (\text{A.54})$$

を得る。また、定理 1 より

$$\begin{aligned} \hat{x}(\omega | y - \hat{y}(Y)) &= \hat{x}(\omega | \tilde{y}) \\ &= \bar{x}(\omega) + \Sigma_{x(\omega)\tilde{y}} \Sigma_{\tilde{y}\tilde{y}}^{-1} (\tilde{y} - \bar{\tilde{y}}) \\ &= \bar{x}(\omega) + P(\omega, \omega_0) H^t \{H P(\omega_0, \omega_0) H^t + R\}^{-1} \{y - H \hat{x}(\omega_0 | Y) - \bar{u}\} \end{aligned} \quad (\text{A.55})$$

を得る。これを、(A.48) 式に代入して

$$\hat{x}(\omega | Y, y) = \hat{x}(\omega | Y) + P(\omega, \omega_0) (H P(\omega_0, \omega_0) H^t + R)^{-1} (y - H \hat{x}(\omega_0 | Y) - \bar{u})$$

を得る。さらに、 $\hat{x}(\omega | Y, y)$  の推定誤差の共分散行列は、系 1.4 より、

$$\begin{aligned} & E[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | Y, y)\}\{(x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | Y, y))\}] \\ &= E[\{x(\omega_1) - \hat{x}(\omega_1 | Y)\}\{(x(\omega_2) - \hat{x}(\omega_2 | Y))\}] - E[\{x(\omega_1) - \bar{x}(\omega_1)\}\{(y - \hat{y}(Y))\}^t] \\ &\quad E[\{y - \hat{y}(Y)\}\{(y - \hat{y}(Y))\}^t]^{-1} E[\{y - \hat{y}(Y)\}(x(\omega_2) - \bar{x}(\omega_2))\}^t] \\ &= P(\omega_1, \omega_2) - P(\omega_1, \omega_0)H^t(HP(\omega_0, \omega_0)H^t + R)^{-1}HP(\omega_0, \omega_2) \end{aligned}$$

となる。

<系 1.6' >

2つの空間 $\Omega_1, \Omega_2$ の直積空間 $\Omega = \Omega_1 \times \Omega_2$ で定義された $n$ 次の確率ベクトル場 $x(\omega), \omega = (t, s) \in \Omega, t \in \Omega_1, s \in \Omega_2$ と、 $x(\omega)$ と互いに結合分布する $p$ 次の確率ベクトルを $Y$ とする。このとき、 $m$ 次の確率ベクトル $y$ が

$$y(t_0) = \int_A h(s_0)x(t_0, s_0)ds_0 \quad (\text{A.56})$$

で定められるとする。また、

$$E[\{x(t_1, s_1) - \hat{x}(t_1, s_1 | Y)\}\{(x(t_2, s_2) - \hat{x}(t_2, s_2 | Y))\}^t] = P(t_1, s_1, t_2, s_2) \quad (\text{A.57})$$

と書く。このとき、

$$\begin{aligned} \hat{x}(t, s | Y, y) &= \hat{x}(\omega | Y) + \int_A P(t, s, t_0, s_0)h^t(s_0)ds_0 \\ &\quad [\int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1)P(t_0, s_1, t_0, s_2)h^t(s_2)]^{-1} \\ &\quad (y(t_0) - \int_A h(s_0)\hat{x}(t_0, s_0 | Y)ds_0) \end{aligned} \quad (\text{A.58})$$

$$\begin{aligned} & E[\{x(t_1, s_1) - \hat{x}(t_1, s_1 | Y, y)\}\{(x(t_2, s_2) - \hat{x}(t_2, s_2 | Y, y))\}] \\ &= P(t_1, s_1, t_2, s_2) - \int_A P(t_1, s_1, t_0, s_0)h^t(s_0)ds_0 \\ &\quad [\int_A d\xi_1 \int_A d\xi_2 h(s_1)P(t_0, \xi_1, t_0, \xi_2)h^t(\xi_2)]^{-1} \\ &\quad \int_A h(s_0)P(t_1, s_1, t_0, s_0)ds_0 \end{aligned} \quad (\text{A.59})$$

である。

(証明)

系 1.4 より

$$\hat{x}(t, s | Y, y) = \hat{x}(t, s | Y) + \hat{x}(t, s | y - \hat{y}(Y)) - \bar{x}(t, s) \quad (\text{A.60})$$

である。そこで、まず $\hat{y}(Y)$ を求めることを考える。いま、 $x(t_0, s_0)$ と $y$ は互いに結合分布する $n$ 次、 $m$ 次の確率ベクトルであるから、

$$\hat{y}(t_0 | Y) = \int_A h(s_0)\hat{x}(t_0, s_0 | Y)ds_0 \quad (\text{A.61})$$

$$\begin{aligned}
& E_{yY}[\{y - \hat{y}(t_0 | Y)\}\{y - \hat{y}(t_0 | Y)\}^t] \\
&= \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) E_{xY}[\{x(t_0, s_1) - \hat{x}(t_0, s_1 | y)\}\{x(t_0, s_2) - \hat{x}(t_0, s_2 | y)\}^t] h^t(s_2) \\
&= \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) P(t_0, s_1, t_0, s_2) h^t(s_2)
\end{aligned} \tag{A.62}$$

である。次に  $\hat{x}(t, s | y(t_0) - \hat{y}(t_0 | Y))$  を求める。簡単のため、

$$\tilde{y}(t_0) = y(t_0) - \hat{y}(t_0 | Y) = \int_A h(s_0) \{x(t_0, s_0) - \hat{x}(t_0, s_0 | Y)\} ds_0 \tag{A.63}$$

とおくと、

$$\bar{\tilde{y}}(t_0) = E_{yY}[y(t_0) - \hat{y}(t_0 | Y)] = E_y[y(t_0)] - E_Y[\hat{y}(t_0 | Y)] = 0 \tag{A.64}$$

$$\Sigma_{\tilde{y}(t_0)\tilde{y}(t_0)} = E_{yY}[y(t_0)\hat{y}(t_0 | Y)] = \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) P(t_0, s_1, t_0, s_2) h^t(s_2) \tag{A.65}$$

である。また、

$$\begin{aligned}
\Sigma_{x(t,s)\tilde{y}(t_0)} &= E[\{x(t, s) - \bar{x}(t, s)\} \tilde{y}^t(t_0)] \\
&= E[\int_A \{x(t, s) - \bar{x}(t, s)\} \{x(t_0, s_0) - \hat{x}(t_0, s_0 | Y)\}^t h^t(s_0) ds_0] \\
&= \int_A E[\{x(t, s) - \hat{x}(t, s | Y) + \hat{x}(t, s | Y) - \bar{x}(t, s)\} \\
&\quad \times \{x(t_0, s_0) - \hat{x}(t_0, s_0 | Y)\}^t] h^t(s_0) ds_0 \\
&= \int_A E[\{x(t, s) - \hat{x}(t, s | Y)\} \{x(t_0, s_0) - \hat{x}(t_0, s_0 | Y)\}^t] h^t(s_0) ds_0 \\
&= \int_A P(t, s, t_0, s_0) h^t(s_0) ds_0
\end{aligned} \tag{A.66}$$

である。また、定理 1 より

$$\begin{aligned}
& \hat{x}(t, s | y(t_0) - \hat{y}(t_0 | Y)) \\
&= \hat{x}(t, s | \tilde{y}(t_0)) \\
&= \bar{x}(t, s) + \Sigma_{x(t,s)\tilde{y}(t_0)} \Sigma_{\tilde{y}(t_0)\tilde{y}(t_0)}^{-1} (\tilde{y}(t_0) - \bar{\tilde{y}}(t_0)) \\
&= \bar{x}(t, s) + \int_A P(t, s, t_0, s_0) h^t(s_0) ds_0 \left[ \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) P(t_0, s_1, t_0, s_2) h^t(s_2) \right]^{-1} \\
&\quad \{y(t_0) - \int_A h(s_0) \hat{x}(t_0, s_0 | Y) ds_0\}
\end{aligned} \tag{A.67}$$

を得る。これを (A.60) 式に代入して、

$$\begin{aligned}
\hat{x}(t, s | Y, y) &= \hat{x}(t, s | Y) + \int_A P(t, s, t_0, s_0) \{h(s_0)\}^t ds_0 \\
&\quad \left[ \int_A ds_1 \int_A ds_2 h(s_1) P(t_0, s_1, t_0, s_2) h^t(s_2) \right]^{-1} \\
&\quad \{y(t_0) - \int_A h(s_0) \hat{x}(t_0, s_0 | Y) ds_0\}
\end{aligned} \tag{A.68}$$

を得る。さらに、 $\hat{x}(t, s | Y)$  の推定誤差の共分散行列は系 1.4 により、



$$\begin{aligned}
& E[\{x(t_1, s_1) - \hat{x}(t_1, s_1 | Y, y)\}\{x(t_2, s_2) - \hat{x}(t_2, s_2 | Y, y)\}^t] \\
= & E[\{x(t_1, s_1) - \hat{x}(t_1, s_1 | Y)\}\{x(t_2, s_2) - \hat{x}(t_2, s_2 | Y)\}^t] \\
& - E[\{x(t_1, s_1) - \bar{x}(t_1, s_1)\}\{y(t_0) - \hat{y}(t_0 | Y)\}^t] \\
& E[\{y(t_0) - \hat{y}(t_0 | Y)\}\{y(t_0) - \hat{y}(t_0 | Y)\}^t]^{-1} \\
& E[\{y(t_0) - \hat{y}(t_0 | Y)\}\{x(t_2, s_2) - \bar{x}(t_2, s_2 | Y)\}^t] \\
= & P(t_1, s_1, t_2, s_2) - \int_A P(t_1, s_1, t_0, s_0) h^t(s_0) ds_0 \\
& [\int_A d\xi_1 \int_A d\xi_2 h(\xi_1) P(t_0, \xi_1, t_0, \xi_2) h^t(s_2)]^{-1} \\
& \int_A h(s_0) P(t_1, s_1, t_0, s_0) ds_0
\end{aligned}$$

となる。

## Appendix B

### 用語集

ここでは、本論文で用いた用語の内、特に、人工知能・情報科学関係の用語と、本論文で定義した用語とを簡単にまとめておく。なお、ここでの既存用語の解説は、あくまで本論文の内容を理解する上での便宜を計るものであって、必ずしもここに示したすべての用語の普遍的な定義を与えるものではないことを断っておく。なお、本用語集を作成するにあたって、主に、

- 斉藤正男・溝口文雄：知的情報処理の設計，コロナ社，1982.
- 長尾真：知識と推論，岩波書店，1988.
- 長尾真 石田晴久・稲垣康善・田中英彦・辻井潤一・所真理雄・中田育男 米澤明憲（編）：情報科学辞典，岩波書店，1990.
- 淵一博（監修）：知識プログラミング，共立出版，1988.
- Winston, P.H.：人工知能，長尾真・白井良明訳，培風館，1980.

を参考にした。

**RS-232C** モデムとデータ端末装置との通信の規格の一つ。計算機と周辺装置（端末やプリンタ）の接続に広く用いられている。

**RPC** Remote Procedure Call（遠隔手続き呼びだし）の略。ネットワークを介して他の計算機にある手続きを，自分の計算機上にある手続きと同一の様式で呼び出す機能。

**インスタンス** オブジェクト指向プログラミングにおいて，クラスによって定義された仕様にしたがって作成される個々のオブジェクトをそのクラスのインスタンスという。

**エキスパートシステム** 特定の領域において，その専門家の持つ知識を計算機内部に整理・蓄積し，これを用いて問題解決を行うプログラムをいう。知識ベースシステムとも呼ばれる。

**SEU モデル** Subjective Expected Utility Model の略称。人間の意思決定モデルの一つ。人間の恐怖への対応行動は，その選択枝が所与の結果を引き起こす主観確率と所与の結果の有用性の積によって決まるとする考え方。

**オブジェクト指向** データとそれに対する手続きを備えたオブジェクトと呼ばれる要素をプログラミングの基本単位として、ソフトウェアシステムを設計する手法。オブジェクト指向に基づく計算機言語は、「カプセル化」、「抽象化」、「継承」、「多相性」といった特徴的な機能を備えている。各機能の詳細は、本文2.4.1項で説明している。代表的なオブジェクト指向言語として、Smalltalk-80、C++、CLOS、Flavors等がある。本論文では、ソフトウェアの記述に、Smalltalk-80とFlavorsを使用した。

**確信度** 一般には、不確実な知識に対してその確実性の程度を数値で表したものをいい、MYCINで用いられたものが有名である。本論文では、第3、4章で洪水制御支援のための推論システムを設計する際に、ファジィ推論システムが出力する結論を他の知識システムが利用する際に、その結論の持つ確実性を表す数値指標を確信度と呼んでいる。

**カプセル化** プログラミングにおいて、データに対する外部からのアクセスをそのデータに予め定義されている手続きのみに限定する情報隠ぺい機能のこと。オブジェクト指向言語に見られる機能である。

**関心度** 本論文第6章で水害避難行動モデルを設計する際に定義した指標の一つ。水害時に世帯が情報を得ようとする態度を0～10の数値で表現する。関心度の値は、その世帯の危険認識度の影響を受けて決まり、情報の入手率に影響を与える。

**危険認識度** 本論文第6章で水害避難行動モデルを設計する際に定義した指標の一つ。住民が現在生起している水害の状態をどの程度危険と感じているかを0～1の数値で表す。

**きっかけ情報** 第6章で水害避難行動モデルを設計する際に定義した情報の種類。水害時に住民が受け取る種々の情報の内、その内容が避難に直接言及しており、避難行動を起こす契機となる可能性の高い情報。具体的には、避難勧告や命令などがこれに属する。なお、本論文では、世帯が避難行動を起こすかどうかは、危険認識度ときっかけ情報の関係で決まると考えている。

**議長型システム** 本文第4章で洪水制御支援のための推論システムを構築するために定義した。協調する知識システム群の通信の調整にあたるシステムであって、メタ知識システムのテンプレートとしても用いている。

**協調問題解決** 単独の知識ベースシステムでは処理が困難な問題を、複数のシステムが処理を分担し協力して解決するような方法。代表的なモデルに、黒板モデルがある。本論文での協調問題解決の方法は、2.4.1、4.2、4.3を参照のこと。

**恐怖コミュニケーション** 人間に恐怖感を引き起こさせるような状況的刺激。人間の意思決定あるいは行動の動機付けとして研究されている。

**クラス** オブジェクト指向プログラミングにおいて、複数のオブジェクトに共通な機能や属性を定義するもの。オブジェクト指向プログラミングでは、クラスを作成することがプログラミングの中心になる。なお、クラスによって定義された仕様にしたがって作成される個々の

オブジェクト（機能や属性は共通しているが属性値のみ異なる）をそのクラスのインスタンスという。

**グレード** 集合  $X$  におけるファジイ集合  $A$  がメンバーシップ関数  $\mu_A$  によって特性づけられているとき、要素  $x \in X$  に対する  $\mu_A(x)$  のことを  $x$  がファジイ集合  $A$  に属するグレードと呼ぶ。

**継承** オブジェクト指向言語の持つ機能の一つで、クラスを階層的に定義できることをいう。あるクラスを他のクラスの下位クラスであると定義すれば、そのクラスは、既に定義されている上位クラスの属性や機能を自分の属性・機能として持つことができる。なお、継承には、単一の上位クラスしか許さないサブクラッシングと複数の上位クラスの性質を引き継げる多重継承の2種類の方法があり、前者はSmalltalk-80、後者はFlavors, CLOS, C++でサポートされている。

**黒板モデル** 協調問題解決の一つの形態。黒板と呼ばれる大域的なデータ格納領域と、複数の知識源からなり、黒板に入れられた問題の解決に貢献できそうな知識源が、次々と黒板に自分の知識による部分的な解を書き込んでいくことにより推論を進める。音声理解システムHearsay-IIに適用されたことで有名である。

**CPU** 中央処理装置。ディジタル計算機において、演算を行う装置と演算装置 記憶装置 入出力装置の制御を行う部分。

**情報依存度** 本論文第7章で、水害避難行動モデルを設計する際に、世帯が判断にあたつてどの程度外部からの情報に依存するかを表すために導入した指標。

**人工知能** AI(Artificial Intelligence)と略称されることも多い。人間の認識や判断、学習といった知的な脳の活動を理解し、機械（計算機）によってその模擬を行うこと、あるいは計算機による模擬を通じて脳の働きを解明しようとする学問分野。なお、関連する分野として、記憶や思考の過程を知識の性質や要素の側面から明らかにしようとする認知科学や、特定の領域において専門家と同等の問題解決能力を持つシステムを開発することを目的とする知識工学等がある。

**水害意識の型** 本論文第6章で水害避難行動モデルを設計する際に、地域に住む世帯が日常的に持っている水害に対する意識や経験を示すために導入した。第6章では、5種類の型を用意し、この型に応じて同じ内容の情報を受け取っても危険性の感じ方が異なるとしてモデルを作成している。

**水害危険観** 本論文第7章で水害意識の変化過程をモデル化するために導入した指標。世帯が日常的に持っている水害の危険性に対する評価を0~1の数値で表現するもので、第6章で導入した水害意識の型に代わるものである。

**推論** 因果関係に関する知識を用いて思考のプロセスをたどっていくこと。例えば、Aという事実（あるいは「Aは真」という知識）と「AならばB」という関係の知識を用いて、「Bは真」という結論を得るプロセスをいう（演繹的推論）。

**推論エンジン** エキスパートシステムにおいて、推論を行う制御機構をいう。知識を一定の形式で整理した知識ベースを検索し、使用すべき知識を決定、実行するという機能を持つ。

**推論システム** 本論文 2.3 節で定義した用語。洪水制御支援システムにおいて、ダム操作規則あるいは規則が実務者に要求する判断を支援する知識のように、プロダクションルールやファジイ推論規則で表現することが適した知識を利用して問題解決を行うシステム。流出計算や流出予測のように数学的表現の適したアルゴリズムによる処理を行う手続き型情報処理システムと区別するために用いている。

**推論環境管理システム** 本論文 2.3 節で定義した用語。洪水制御支援システムにおいて、データ収集システムと推論システムとの仲立ちをするシステム。具体的には、新たなデータ（雨量や流量など）が得られる場合など推論の必要性を監視する機能、推論結果の記録指令や画面表示指令などを出す機能を持つ。

**Smalltalk** 計算機言語の一つで、オブジェクト指向プログラミングを実現している。オブジェクト指向言語と呼ばれる計算機言語の中では、おそらく、最もオブジェクト指向概念に忠実かつ一貫性のある言語である。本論文では、第 2 章、第 3 章で示した洪水制御支援システム、第 6 章で示した水害避難行動モデルの記述に smalltalk-80 を用いた。

**多相性** オブジェクト指向言語の持つ機能の一つ。同一の名称で機能呼び出ししても、オブジェクトに応じて適切な反応をさせることのできる機能である。例えば、円を表すオブジェクトと三角形を表すオブジェクトの両者に自分を画面上に表示する機能呼び出す名前として display を定義したとすれば、円に display を指令すれば円を表示し、三角形に display を指令すれば三角形を表示させることができる。多相性により、各オブジェクトの持つ機能を表す名前に汎用性を持たせることができる。

**知識システム** 知識ベース（特定の知識表現方法に基づく知識の集合）と推論エンジン（知識ベースの中の知識を適用する機構）を持ち、入力である事実情報に対して、知識ベースの内容を適用した結論を出力するシステム。本研究では、洪水制御や避難行動の意思決定のプロセスにおいて、解決しなければならない問題要素を扱うための知識をもつシステムであり、洪水制御支援システムにおいては推論システムの、避難行動モデルにおいては世帯の意思決定システムの構成要素となっている。

**知識ベース** 特定の問題について、それを解決するために適した形態で知識を整理・集積したもの。プロダクションシステムのルールベースはこれにあたる。

**抽象化** プログラミングにおいて、データの構造とそれに対する操作を一体にして、データを定義すること。オブジェクト指向言語においてクラスを定義することに他ならない。

**定性推論** 定性的推論ともいう。現象間の因果関係を定性的なレベルで明らかにし、その関係を用いて推論を行う方法。物理量そのものよりも、量の大小関係や増加・減少傾向に着目した知識を利用する方法ともいえる。状態が時間的に推移する系の挙動を解析することに用いられることが多い。

**データ参照システム** 本論文第4章で、洪水制御支援を行う推論システムと観測データの受信・管理を行うシステムを別のホスト上に実装し、LANを通じてデータのやりとりを行うために、推論システム側に導入したシステム。具体的には、データが必要になったときに、データ管理を行うホストにRPCを行い、データを入手する機能を持っている。

**手続き型知識** 知識の表現形式には、大別して、手続き的表現と宣言的表現の2種類がある。例えば、「流出計算を行う方法に貯留関数法がある」という知識（宣言的表現）は、場面によって「流出計算には貯留関数法を使う」といった手続き的表現にすることもできる。対象とする問題によって、どちらが適しているかは異なってくる。本研究では、通常、数学的アルゴリズムが手続き的表現で表されるため、数学モデルに基づく数値処理を行うシステムを手続き型情報処理システムと呼び、推論システムと区別している。

**ニューラルネットワーク** 人間の脳を構成する神経回路網、あるいは、これを模擬して情報を処理するモデル。応用面では、パターン認識などに優れた能力を発揮している。

**ファジイ関係** 「 $x$  と  $y$  はほぼ等しい」といった曖昧な関係を表現するために、ファジイ集合を基にして定義される関係。全体集合  $U$  に関するファジイ関係は、直積集合  $U \times U$  上のファジイ集合で表現される。

**ファジイ推論** ファジイ関係を用いて表現された知識を用いて、推論を行う方法。具体的な計算方法の例については、本文3.3.1項を参照のこと。

**ファジイ理論** 識別分類における曖昧な概念を表現するために Zadeh が導入したファジイ集合を基礎とする数学の一分野。通常の集合が全体集合  $U$  から  $\{0, 1\}$  への写像（特性関数）で特性づけられるのに対し、ファジイ集合は  $U$  から区間  $[0, 1]$  への写像で特性づけられる。ファジイ集合を特性づける関数をメンバーシップ関数と呼ぶ。ファジイ集合の概念は、エキスパートシステム、OR、実時間制御等多くの分野への応用が試みられている。

**深い知識・浅い知識** エキスパートシステムの行う仕事に応じて決まる知識のレベル。直接問題の解決に用いられる形式で表現されている知識を浅い知識、浅い知識の正当性を保証するような、あるいは、浅い知識を生成できるような対象とする系の構造に関する知識を深い知識という。例えば、機械の故障を診断する場合、症状と故障箇所を直接記述した知識は浅い知識であり、機械そのものの構造や構成部品の機能に関する知識は深い知識であるととらえることができる。

**Flavors** オブジェクト指向プログラミング言語の一つで、Lisp に基づいている。本論文では、第4章の洪水制御支援システム、第7章の水害避難行動モデルの記述に用いた。

**フレーム** Minsky が提案した知識表現方法。対象とする事物や概念を表すフレーム名とその属性を表すスロットを用いて知識を表現しようとする。階層的な知識の表現に適している。

**プロダクションシステム** IF-THEN 形式で表現された知識（プロダクションルール）を用いて、事実情報を書き換えることによって推論を進める情報処理の形態。通常、知識の集合である

ルールベース（知識ベースと呼ばれることもある）、事実情報を格納したワーキングメモリー（データベースとも呼ばれる）、推論を進める制御機構である推論エンジンの3要素からなる。前向き推論の場合、ルールとワーキングメモリー内の情報との照合を行い実行可能ルールを探す照合、実行可能ルールの中から実際に使用するルールを選ぶ競合解消、ルールの結論部を実行する動作が基本で、このサイクルを認知-実行サイクルという。動作によってワーキングメモリー内の情報が書き換えられ、新たな認知-実行サイクルが適用可能となる。本論文での使用方法は、2.4.1 項を参照のこと。

**メタ知識** 特定の表現で記述された知識に対して、その知識の構造や性質に関する知識のことをいう。知識ベースを有効利用するために用いる知識ということもできる。本論文では、第4章において洪水制御に必要な判断に関して、利用可能なデータに応じて異なった立場から複数の知識システムに結論を出力させ、その結論を調整するシステムをメタ知識システムと呼んでいる。

**LAN** Local Area Network の略。ひとつの建物内などの比較的狭い空間内にある計算機や端末、出力装置などを相互に接続し、通信・資源の共有等を実現するもの。

**Lisp** 計算機言語の一つで、リストと呼ばれるデータ構造を中心に処理を行う。記号処理に優れていることから、人工知能システムの実装に広く利用されている。本研究では、第4章の洪水制御支援システム、第7章で示した水害避難行動モデルの記述に用いている。